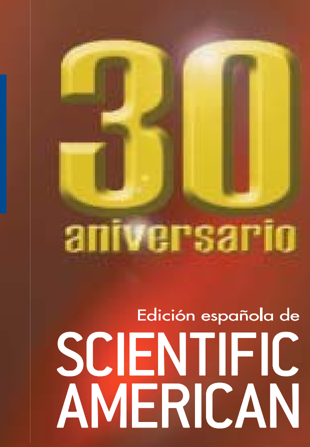
ACUAPORINAS: LOS CANALES DE AGUA CELULARES • ROBOTS MONOBOLA

INVESTIGACION y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SUPERNOVAS

- INGENIERIA HIDRAULICA EN EL MEXICO PREHISTORICO
- REGULACION DE LA AUTOINMUNIDAD
- ¿EXISTE UN FUTURO PARA LA ENERGIA NUCLEAR?
- PERSPECTIVAS DEL MOLDEADO MOLECULAR



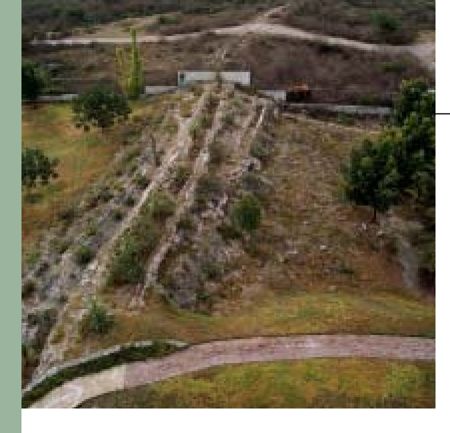
DICIEMBRE 2006
6,00 EUROS

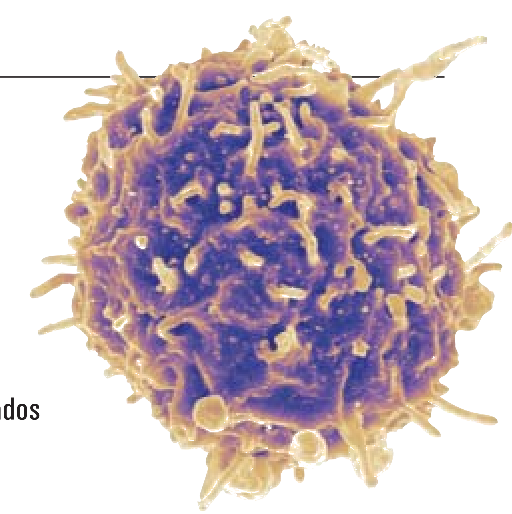


Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

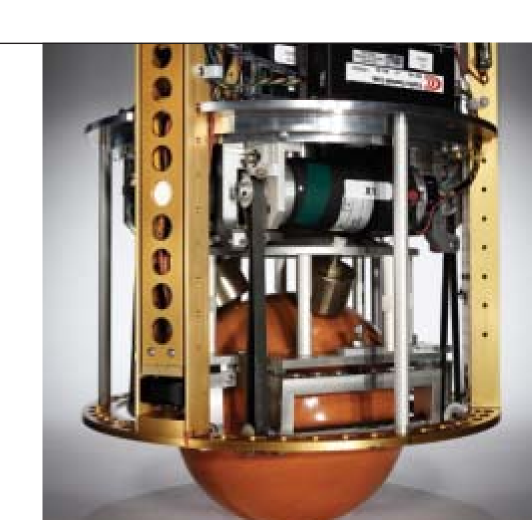
Diciembre de 2006

Número 363













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Brian Napack

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Ingeniería hidráulica en el México prehistórico*; M.ª Rosa Zapatero: *Supernovas*; Juan M. González Mañas: *Regulación de la autoinmunidad*; Joandomènc Ros: *Impacto desde las profundidades*; Javier de Mendoza: *Perspectivas del moldeado molecular*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; M.ª Rosa Vallés: *Ciencia y gastronomía*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Phil Saunders, *Space Channel Ltd.*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

EL ELEMENTO 101. «No apartábamos los ojos del registrador de impulsos conectado a la cámara de ionización. Pasó una hora. La noche avanzaba lentamente hacia el alba, en una espera que parecía inacabable. Entonces, ¡ocurrió! El estilete del aparato se disparó al centro de la escala y luego retrocedió, dejando una nítida traza roja reveladora de un intenso impulso de ionización, 10 veces más fuerte que el que produciría una partícula alfa. En ninguno de los ensayos realizados con la radiación de fondo durante muchos días antes del experimento se había registrado un impulso como aquél. Parecía lo más probable que la señal fuese ciertamente una prueba de la tan ansiada fisión. Siguió la vela. Al cabo de una hora más o menos, el estilo registró un segundo impulso igual al primero. Ya estábamos seguros de haber presenciado la desintegración de dos átomos del elemento 101 y de haber añadido un nuevo miembro a la nómina de elementos químicos. —Albert Ghiorso y Glenn T. Seaborg» [*Nota de la redacción: por este trabajo, Seaborg había recibido el premio Nobel de Química de 1951.*]

FLEXÁGONOS. «Las matemáticas deben mucho a los juegos, y al revés. En los años recientes, algunos de los cerebros más destacados se han visto fascinados por un divertido ejercicio con tiras de papel, descubierto en un momento de ocio por un estudiante de matemáticas británico en la Universidad de Princeton. La cuestión surgió de la trivial circunstancia de que las hojas de los cuadernos británicos y americanos no son del mismo tamaño. —Martin Gardner.» [*Nota de la redacción: Este artículo fue la primera de las numerosas colaboraciones de Martin Gardner en esta revista.*]

...cien años

PRIMEROS VUELOS. «En la historia de las invenciones probablemente no haya nada comparable al modo poco ostentoso en que los hermanos Wright, de Dayton (Ohio), presentaron al mundo su trascendental invento de la primera máquina que voló como un avión. Su logro señaló un paso adelante de tal magnitud en el arte de volar, se proclamó tan escasamente y fue de tal genialidad, que se abrigaron toda clase de dudas acerca de su veracidad; especialmente cuando los inventores se negaron a dar acceso a la máquina y a publicar detalles sobre la misma. Pero *Scientific American* escribió a los diecisiete testigos oculares a los que se mencionaba como espectadores de los distintos vuelos; de tan acreditados residentes locales se recibieron cartas que despejan por completo toda duda acerca de lo conseguido. Por desgracia, los círculos aeronáuticos extranjeros no acertaron a valorar la importancia de los hechos tal como se dieron a conocer; cuando hace poco Santos-Dumont realizó su corto vuelo de unas decenas de metros, en Europa se le reconoció el mérito de haber completado con éxito el primer vuelo.»

PEATONES MARINOS. «La invención de Monsieur de Pluvy, distinguido ingeniero hidrográfico de París, es toda una novedad entre los equipos de inmersión. El traje consta de placas metálicas ligeras y resistentes. Las articulaciones y ensambles están hechos de cuero y caucho prensados. El aire no lo recibe el buzo desde el exterior, como de costumbre, sino que el mismo aire que exhala se envía por un tubo a una cámara especial de regeneración que contiene sustancias que renuevan el suministro de oxígeno. M. de Pluvy en persona ha logrado descender hasta los cien metros con este nuevo traje de buzo.»



El traje de buzo de Pluvy, una puerta al reino de Neptuno, 1906

...ciento cincuenta años

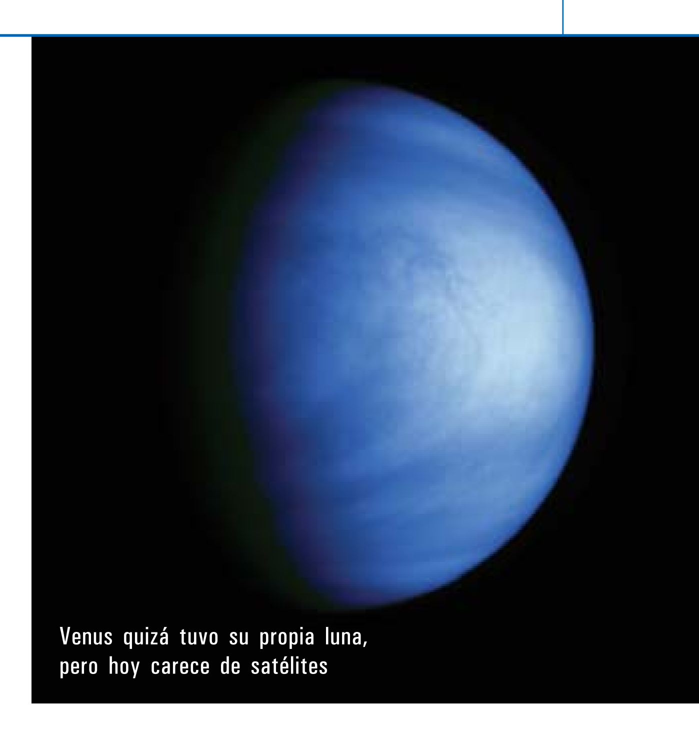
PROBLEMAS CON EL ÉTER. «Noticias de Bahía (Sudamérica) dan cuenta del incendio en aquel puerto de uno de los barcos de vapor y éter combinados, de nombre *La France*. En aquel clima cálido fue imposible mantener el éter en estado líquido; grandes cantidades del mismo se escaparon de los depósitos que lo contenían, se prendió fuego y abrasó el buque entero. El éter hierve a 35,6 ºC, por lo que fue una estupidez extrema por parte de los responsables del buque hacer que éste llevara éter hasta un clima como ése, donde el agua de la bahía alcanza a menudo los 38 ºC.»

APUNTES

ASTRONOMIA

Las inexistentes lunas de Venus

Uno de los grandes misterios del sistema solar concierne a la ausencia de lunas en Venus. Según un modelo reciente, sin embargo, la habría tenido. La perdió, destruyéndola. ¿Cómo? Ante la asamblea que acaba de celebrar la Sociedad Norteamericana de Astronomía, Alex Alemi y David Stephenson, del Instituto de Tecnología de California, expusieron el nuevo modelo: Venus habría sufrido no sólo un impacto, del tipo de la colisión que se supone formó el satélite terrestre, sino dos. El primer choque impartió al planeta una rotación en sentido contrario a las agujas del reloj y creó un satélite, cuya órbita, lentamente, habría ido separándose de Venus. Hasta que un segundo gran impacto impartió a Venus una rotación en sentido antihorario, con el que se canceló el efecto del primer choque. Tamaña inversión modificó las interacciones gravitatorias entre la luna y el planeta. El satélite empezó un movimiento de aproximación hacia el planeta, hasta caer en él. A su vez, el segundo impacto pudo haber creado o no creado una luna también. Si tal aconteció, el nuevo satélite habría terminado como el primero, atraído y destruido. *—George Musser*



Venus quizá tuvo su propia luna, pero hoy carece de satélites

FISICA

Teleportación de luz a materia

Un equipo encabezado por Eugene Polzik, del Instituto Niels Bohr, e Ignacio Cirac, del Instituto Max Planck, ha teleportado información almacenada en un haz de luz hasta una nube de átomos. Primero se entrelazaron cuánticamente el láser y los átomos, de forma que compartiesen un estado cuántico complementario. Para ello iluminaron una nube de átomos de cesio con un intenso haz de láser. Un segundo pulso de luz de láser, más débil, que guardaba la información que debía teleportarse, se mezcló con el haz intenso y se midieron las amplitudes y fases combinadas. Con los resultados se alteró el estado cuántico de la nube de cesio para que concordarse con el estado cuántico del pulso débil. En efecto, el estado cuántico se transfirió, o teleportó, entre los dos.

—J. R. Minkel



ONCOLOGIA

Frenos del cáncer en los lunares

La mayoría de los lunares alberga mutaciones que pueden desencadenar un letal cáncer de piel. Sin embargo, no suele suceder así. Se han descubierto varios mecanismos que impiden que las células de cierto tipo de lunar sigan reproduciéndose, pese a contener diversas mutaciones y oncogenes. El retículo endoplasmático, orgánulo celular que promueve el plegamiento de los aminoácidos para formar proteínas, percibe la presencia de los oncogenes y suspende dicho plegamiento. Con ello se desactiva a tiempo la célula cancerosa. Aunque así se previene el crecimiento del tumor, las células tumorales podrían aprovechar ese estado —aunque vivas, sin mitosis— para resistir a los fármacos. Con otras palabras, el mecanismo interno lo mismo puede prevenir el cáncer que promover su desarrollo.

—David Biello

La mayoría de los lunares no suelen terminar en cancerosos

NASA/JPL *(arriba)*; BSIP, CHASSENET *Photo Researchers, Inc.* *(abajo)*

BIOQUIMICA

Antihemorrágicos

En el frente de guerra y en los quirófanos se recurre a diversos procedimientos para cortar hemorragias. Todos adolecen de algún inconveniente. El que no provoca un exceso de calor, forma coágulos o desencadena reacciones alérgicas. Se acaba, sin embargo, de presentar una nueva solución proteica biodegradable, de rápida acción antihemorrágica, que podría incluso resultar inocua y perdurable en animales. El líquido, producido a partir de péptidos, podía reparar nervios ópticos en hámsters y controlar derrames cerebrales en ratones. Según parece, el líquido formaba una red fibrosa alrededor de la herida, que paraba la hemorragia. Aunque se ignoran los detalles del proceso, todo indica que no se generan coágulos sanguíneos.

—J. R. Minkel



Un líquido proteínico podría cortar las hemorragias en segundos

EDAFOLOGIA

¿Por qué suele ser marrón el suelo?

La mayoría de las longitudes de onda visibles de la luz son absorbidas por las grandes cantidades de carbono inorgánico que el terreno contiene, lo que le confiere su característico color pardusco. (Cuando los aflujos de carbono al suelo son bajos por culpa de la erosión o de la falta de vegetación en crecimiento, toma los colores rojos, amarillos o grises de los minerales subyacentes.) La pregunta obvia será, pues: ¿Por qué el suelo tiene tanto carbono? Contiene, sumados los de todo el planeta, de 1500 a 2300 petagramos (10^{15} g) de carbono. Esa cantidad es de dos a tres veces la cantidad de carbono que almacenan las plantas. Una fracción importante de ese carbono del suelo tiene de centenares a miles de años de edad. ¿Cómo es posible, cuando tantas especies de bacterias, hongos e invertebrados se descomponen y consumen carbono en los suelos? Tras la muerte de las plantas, los descomponedores asimilan parte de su carbono y el resto lo liberan en forma de dióxido de carbono. Cuando esos descomponedores mueren, su carbono puede ser también consumido y transpirado por otros descomponedores. Pero algunos factores pueden bloquear la acción de los descomponedores. Numerosos microorganismos secretan enzimas que lisan los compuestos orgánicos en moléculas pequeñas, para su absorción posterior. Pero no todas las formas de carbono de suelos admiten fácil degradación. El material procedente de las paredes celulares de microorganismos muertos reacciona con otros compuestos de carbono alojados en el suelo, para constituir polímeros complejos. Buena parte de ellos son compuestos "húmicos", que se forman en los suelos porque sus estructuras químicas resisten los ataques enzimáticos. Junto con otras moléculas similares, los polifenoles, se enlazan, para inactivarlas, a las mismas moléculas que podrían degradarlos. Hay otros factores del ecosistema que rebajan la eficiencia de las enzimas microbianas. En los suelos pobres en nitrógeno, los microorganismos quizá carezcan de nutrientes para sintetizar enzimas. Y como algunas enzimas requieren un sustrato de oxígeno, unas condiciones anóxicas (como en los terrenos pantanosos o en las turberas) pueden hacer que se acumule carbono en el suelo.

—Steven Allison, Universidad de California en Irvine

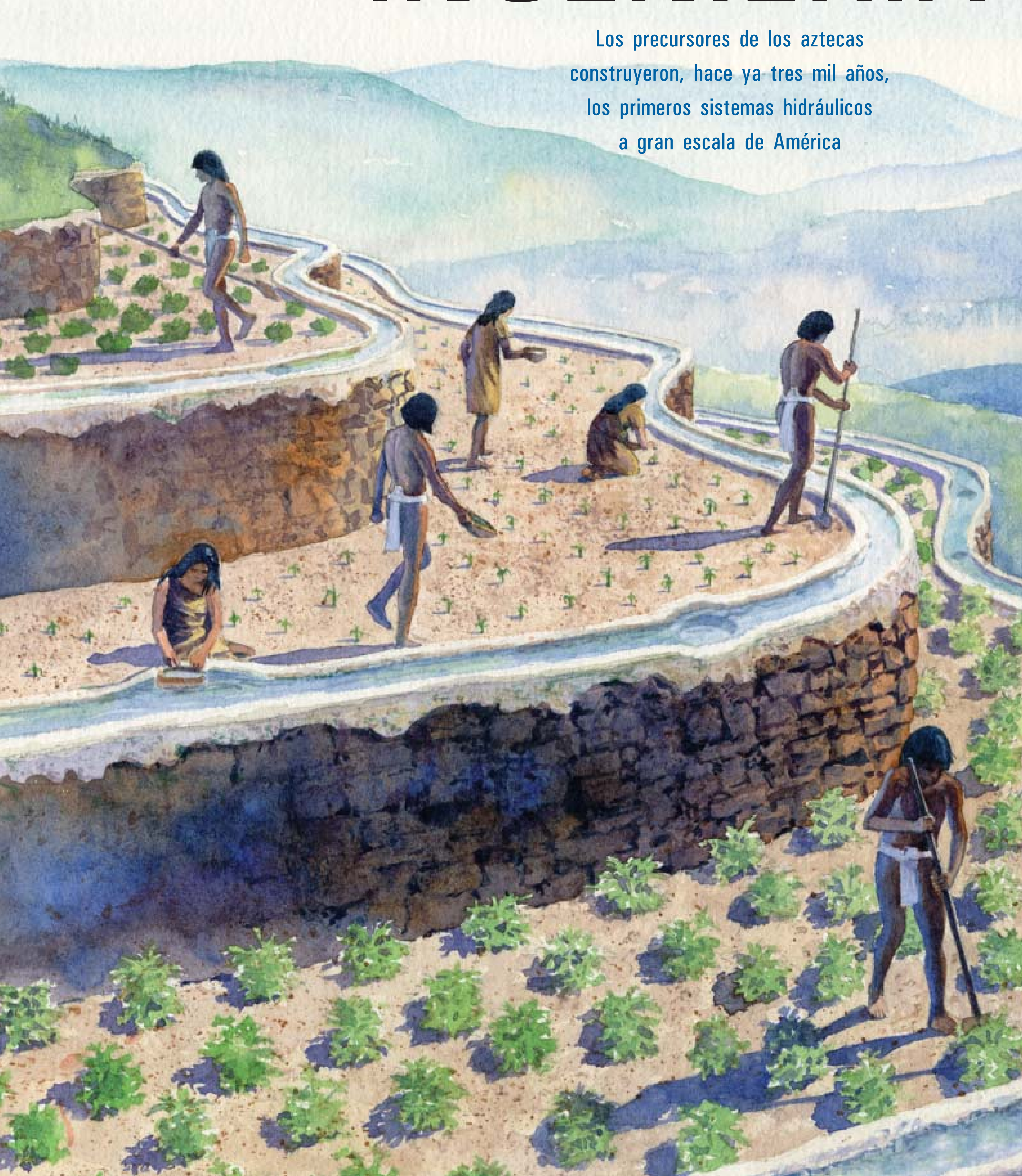


El color marrón del suelo se debe al carbono que contiene

ICONICA *Getty Images (arriba)*

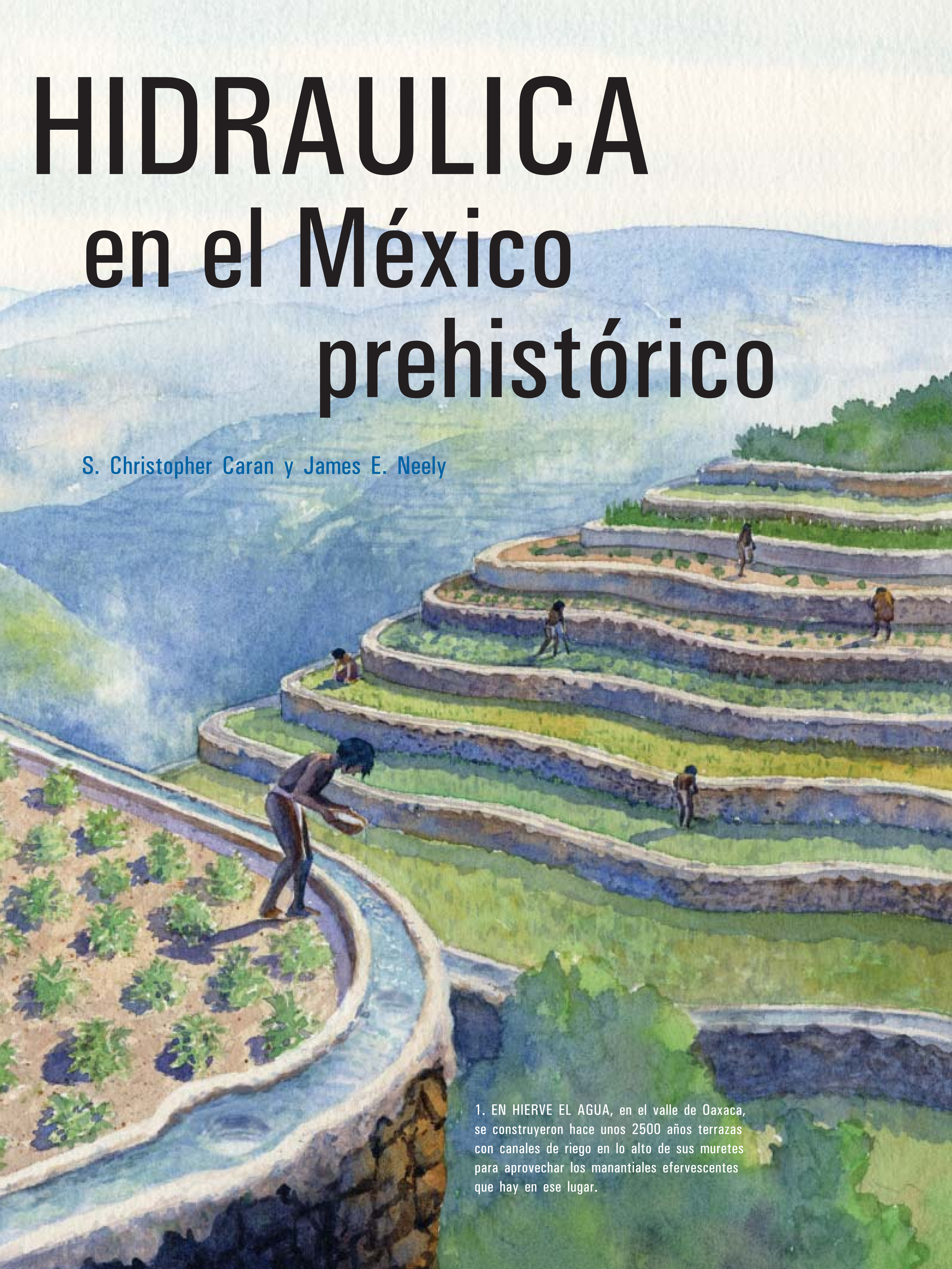
INGENIERIA

Los precursores de los aztecas construyeron, hace ya tres mil años, los primeros sistemas hidráulicos a gran escala de América



HIDRAULICA en el México prehistórico

S. Christopher Caran y James E. Neely



1. EN HIERVE EL AGUA, en el valle de Oaxaca, se construyeron hace unos 2500 años terrazas con canales de riego en lo alto de sus muretes para aprovechar los manantiales efervescentes que hay en ese lugar.

Los agricultores prehistóricos del sur de México debieron de anhelar un milagro. El clima tropical hacía que los fértiles valles de la región fuesen casi ideales para el cultivo, a pesar de hallarse a poco menos de 2000 metros de altitud; las intensas lluvias aseguraban cosechas abundantes durante los seis meses de la estación monzónica. Tan favorables condiciones hicieron de esta región la cuna de la agricultura del Nuevo Mundo y el suelo natal del maíz. Pero aquellos campesinos primitivos tenían que afrontar una limitación crucial: durante medio año, el tiempo era demasiado seco para cultivar. Si dispusieran de agua durante todo el año, sus campos, que roturaban a mano, les proporcionarían dos —e incluso tres— cosechas anuales. Mas, ¿cómo obtener esa agua?

La solución no llegó de un milagro, sino de una maravilla del ingenio humano, de obras de ingeniería a gran escala, pensadas para almacenar y transportar agua. Su construcción, de cuyos modestos orígenes apenas quedan rastros, fue progresando gradualmente hasta alcanzar una escala monumental. La presa de Purrón, por ejemplo, construida en el valle de Tehuacán hacia 750 a.C., tenía una longitud de 400 metros, 100 de anchura y su alzado era de casi 25 metros. Los obreros transportaron a mano, a razón de unos cuantos kilos en cada viaje, unos 2,64 millones de metros cúbicos de tierra. Es probable que esta presa fuese la mayor estructura de retención de agua de América hasta el siglo XVIII. Los antiguos ingenieros construyeron en sus aledaños miles de kilómetros de canales y acueductos, que precedieron en dos milenios la llegada de los europeos a México. Desviaron y canalizaron las aguas de manantiales y avenidas, las condujeron a través de las divisorias de escorrentía y las hicieron contornear cañones o bajar por empinadas laderas. Otras ingeniosas obras recogían el agua de lluvia en edificios y plazas. Los pueblos del México meridional sacaron provecho de todas las formas de aprovisionarse de agua que ofrecía su entorno.

Muchas de aquellas estructuras de recogida y riego sobrevivieron en un estado excelente durante 1500 años, si no más; en ciertos lugares hasta casi 3000, lo que atestigua la excelencia de su diseño y construcción. Tales proezas serían extraordinarias desde cualquier punto de vista, pero resultan todavía más notables teniendo en cuenta que los constructores carecían de herramientas de metal, de transporte rodado y de animales de tiro. Los restos más antiguos que han sobrevivido dejan ver un muy alto grado de innovación técnica y hacen sospechar que debió de existir un sistema muy elaborado de administración y mantenimiento de esta masiva infraestructura. Se han descubierto sistemas prehistóricos de gestión del agua en buen número de localidades mexicanas; un examen atento de un par de ellas —los grandes canales del valle de Tehuacán y la fantástica red de riego en terrazas del valle de Oaxaca— arrojará luz sobre el ingenio de los antiguos ingenieros hidráulicos.

La investigación moderna de estos dos yacimientos dio comienzo a finales del decenio de 1960 y principios del siguiente, en sendas excavaciones dirigidas por dos figuras legendarias de la arqueología, Richard S. MacNeish (apodado "Scotty") en el valle de Tehuacán y Kent V. Flannery en el de Oaxaca. Uno de los autores (Neely) era a la sazón un joven que acababa de terminar la carrera y tuvo el privilegio de participar en ambos estudios. Ninguna de aquellas excavaciones estaba enfocada al estudio de la gestión hidráulica; a pesar de la evidente importancia de tales sistemas, tras unas someras evaluaciones hubo un prolongado hiato. Sin embargo, la fascinación de Neely por el agua fue persistente. Veinte



2. DURANTE EL PERIODO PREHISTORICO se construyeron sistemas de gestión del agua en varias regiones repartidas por el sur de México. El más antiguo de los ejemplos conocidos, un pozo en San Marcos de Necoxtla, tiene 10.000 años de antigüedad. La construcción de sistemas continuó hasta la llegada de los europeos.

Resumen/Regadíos de la antigüedad

- Los agricultores prehistóricos del sur de México tenían que afrontar todos los años una sequía de seis meses.
- Para lograr sus cosechas anuales, los campesinos desarrollaron ingeniosos procedimientos de transporte del agua hasta los huertos. Crearon represas, pozos, canales, acueductos y terrazas de cultivo.
- Dos de esos sistemas de riego dan fe de la capacidad de aquellos ingenieros: una red de canales en el valle de Tehuacán y un sistema de terrazas en el valle de Oaxaca regadas desde canales construidos en lo alto de los muretes de contención.



3. TODAVIA SON VISIBLES en Hierve el Agua los restos de los antiguos huertos aterrazados, que en la fotografía contornean la charca de un manantial de aguas efervescentes.

CORTESIA DE JAMES A. NEELY

años después, invitaba a un geólogo (Caran, coautor de este artículo) a sumarse a un análisis más exhaustivo de aquellas obras hidráulicas. Sus hallazgos, como se verá, resultaron asombrosos.

Canales, acueductos y tecoatles

La red de canales del valle de Tehuacán, en el sur de México, resultó ser el mayor de los sistemas de gestión hidráulica prehistórica del Nuevo Mundo. Estos canales suman más de 1200 kilómetros de longitud. Suministraban agua a 330 kilómetros cuadrados de tierra cultivable —una región cuyo tamaño es casi el de la franja de Gaza—, y ello hace más de 2500 años. Los regantes creaban canales excavando un surco en el suelo; debían de construir pequeños caballones a cada lado. Cada canal se surtía de un punto situado en zonas más elevadas y conducía el agua hasta campos más abajo, siguiendo a menudo una trayectoria sinuosa para mantener un ligero gradiente de 2 grados o menos.

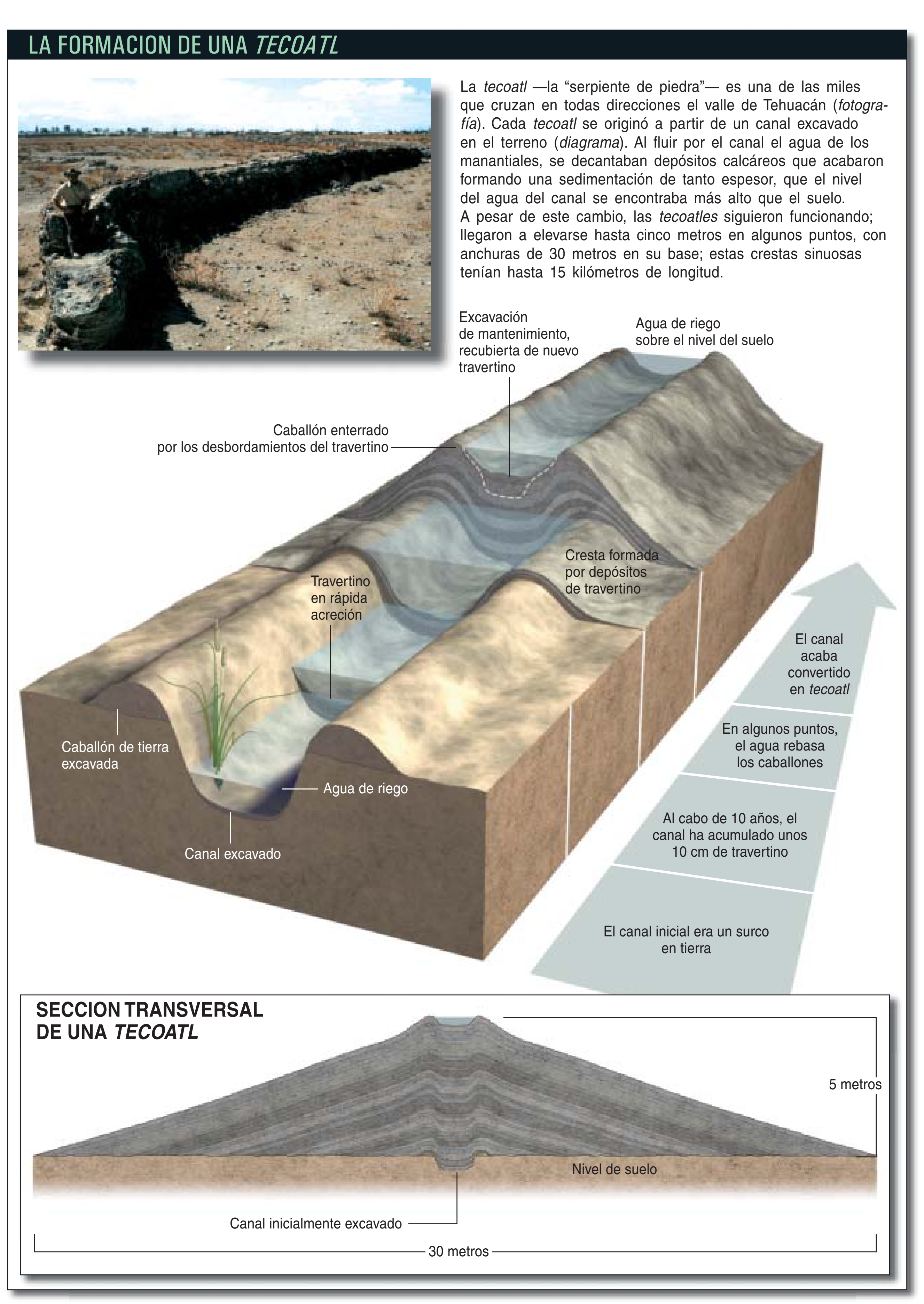
Casi toda el agua de riego se tomaba de grandes manantiales. Era rica en minerales disueltos, especialmente, en calcita, que es una forma de carbonato de calcio. Estos minerales, al depositarse en los canales, contribuían a su conservación, revistiéndolos de un recubrimiento impermeable, pero a la larga acababan amenazando su supervivencia. Al tiempo que el agua de las fuentes fluía por los canales, la evaporación y los cambios de temperatura provocaban que los compuestos en disolución se concentrasen tanto, que en la superficie interior del canal se depositaba una delgada película de minerales cristalizados. La contribución mineral de cada litro de agua era diminuta, pero es probable que el gasto de algunos de los grandes canales superase los 500 metros cúbicos diarios. Una capa tras otra se sedimentaba y endurecía, formando un revestimiento pétreo de travertino calcáreo, un material similar al de las estalactitas y las estalagmitas de las cuevas. Estos estratos se iban acumulando a razón, por término medio, de un centímetro al año, es decir, un metro en cada siglo.

La sedimentación fue tan amplia que muchos de los canales empezaron a cegarse. No obstante, el flujo continuó, porque el travertino se depositaba no sólo en el lecho del canal, sino también allí por donde el agua se desbordase. En consecuencia, las paredes del canal se fueron elevando, formando diques que por lo general conservaban el agua en su seno, incluso por encima del nivel del suelo. El agua continuaba desbordándose en ocasiones, depositando al hacerlo capas minerales situadas fuera del canal primitivo. De esta forma, lo que inicialmente fue un pequeño canal excavado en el suelo se convertía en una loma de hasta 5 metros de altura y de 30 metros de anchura en su base, con un canal que corría a lo largo de su cresta. Ayudado, posiblemente, por mantenimientos periódicos, el canal conservaba su sección transversal en U y seguía elevándose y funcionando.

La naturaleza pétrea y las formas alargadas y sinuosas de estos canales "fósiles" debió de inspirar el nombre que recibieron en la lengua azteca: *tecoatl*, o "serpiente de piedra". Esas *tecoatles*, que podían tener varios kilómetros de longitud, transformaron el paisaje, creando barricadas que afectaron a la alineación de los caminos y la planificación de villas y ciudades desde los tiempos prehistó-

LA FORMACION DE UNA *TECOATL*

La *tecoatl* —la "serpiente de piedra"— es una de las miles que cruzan en todas direcciones el valle de Tehuacán (*fotografía*). Cada *tecoatl* se originó a partir de un canal excavado en el terreno (*diagrama*). Al fluir por el canal el agua de los manantiales, se decantaban depósitos calcáreos que acabaron formando una sedimentación de tanto espesor, que el nivel del agua del canal se encontraba más alto que el suelo. A pesar de este cambio, las *tecoatles* siguieron funcionando; llegaron a elevarse hasta cinco metros en algunos puntos, con anchuras de 30 metros en su base; estas crestas sinuosas tenían hasta 15 kilómetros de longitud.



CORTESIA DE JAMES A. NEELY (*fotografía*); ©MATTHEW FREY *Wood Ronsaville Harlin, Inc.* (*ilustraciones*)

ricos y el período de la colonización española hasta nuestros días.

En los lugares donde no era posible construir canales (en laderas demasiado inclinadas, por ejemplo), los regantes idearon canales alzados sobre el suelo —acueductos—, construidos con piedras sin sujeción de mortero y con tierra compactada. En comparación con los acueductos romanos más o menos coetáneos, se trataba de estructuras bastante simples, pero no por ello menos eficaces.

Tenemos un ejemplo interesante en el cañón del río Xiquila. Este lugar cuenta con dos acueductos, a distinta altura sobre el río. Ambos tenían una anchura aproximada de un metro y un gradiente casi constante, a pesar de las paredes irregulares del cañón. La edad de estas estructuras se ha determinado gracias a fragmentos de cerámica de tipo y antigüedad conocidos. El acueducto situado a menor altura, que mide un kilómetro de longitud, se construyó hacia el 400 de nuestra era y se eleva entre 4 y 12 metros sobre el río. Este segmento sufría por las riadas y corrimientos de tierra y fue abandonado hacia el año 700. El acueducto superior, construido por esa época, se alzaba entre 20 y 22 metros sobre el río y tenía una longitud de más de 6 kilómetros. Estuvo en servicio hasta 1540 por lo menos. Estos acueductos transportaban cantidades no muy grandes de agua de manantial y no llegaron a fosilizarse.

Los canales que sí se fosilizaron nos proporcionan una historia indeleble de la forma en que se utilizaron y del ambiente en que funcionaron. En las capas de travertino se hallan atrapados abundantes restos de algas acuáticas, diatomeas y musgos, así como plantas de humedal mucho mayores, que crecieron dentro o a lo largo de los canales. Al tratarse de organismos sensibles a los cambios en las condiciones ambientales, podemos hoy reconstruir la composición química del agua, su carga de nutrientes, la velocidad con que fluía y su claridad. El travertino ha conservado también pólenes de plantas cultivadas en las huertas cercanas, y así podemos saber que los canales servían para la irrigación de maíz, pimientos y tomates. La amaranta, o se plantaba —hoy se cultiva, y muy posiblemente también en los tiempos antiguos—, o crecía silvestre en los contornos de los campos. Juncos y cañas prosperaban a lo largo de los canales —sin necesidad de cultivarse—; los antiguos campesinos quizá recolectaron estas plantas útiles como alimento, por sus fibras o para astas de flecha.

Dado que los canales creaban un hábitat acuático artificial muy dispar de sus alrededores semiáridos, podemos tener la seguridad de que las plantas acuáticas que componen la mayoría de los restos orgánicos del travertino eran coetáneas con el período de utilización del canal. La materia orgánica conservada nos ha concedido una notable oportunidad: aplicar el método de datación por carbono radiactivo, que se basa en características del carbono procedente de organismos vivos, para determinar directamente la edad de los canales. De ordinario, la edad de los sistemas hidráulicos de la antigüedad, ha de inferirse a partir de los asentamientos humanos y de los artefactos que se encuentren en sus cercanías, método plagado de ambigüedades, porque no siempre es evidente que esos indicadores cronológicos pertenezcan a una misma época. Los análisis mediante carbono radiactivo resolvieron este problema; demostraron que algunos de los canales se construyeron en 800 a.C. y que los trabajos en esas estructuras prosiguieron hasta los primeros decenios del siglo XVI.

Regadío de las terrazas

A unos 170 kilómetros al sureste del valle de Tehuacán, en las montañas del extremo meridional del valle de Oaxaca, existe un yacimiento arqueológico, muy notable, que ilustra el ingenio y la adaptabilidad de los ingenieros hidráulicos prehistóricos de México. En el lugar llamado Hierve el Agua, el regadío permitió la agricultura continuada durante dieciocho siglos cuando menos, desde 500 a.C. hasta 1350. El agua de riego era suministrada por varios manantiales perennes de flujo poderoso, dotados además de propiedades poco corrientes. A pesar de su nombre, las aguas de Hierve el Agua no están calientes; son, en cambio, aguas naturales carbónicas, como el agua de Vichy. El agua carbónica natural contiene en disolución una cantidad elevada de dióxido de carbono gaseoso, procedente del magma subterráneo, de la metamorfosis de las calizas o de otros procesos complejos. El agua,





4. TRES TECOATLES PARALELAS (*a la derecha*): las dos más pequeñas son ramales que iban hasta antiguos huertos cercanos. La *tecoatl* principal, todavía no excavada, que se observa al otro lado de la pared blanca del centro, corre hacia lo que es hoy el centro de la ciudad de Tehuacán. Algunas construcciones modernas (*abajo*) han dañado parte del antiguo canal.

CORTESIA DE JAMES A. NEELY

en lo más profundo del subsuelo, se encuentra confinada a una enorme presión, que mantiene al gas en disolución, lo mismo que un recipiente hermético mantiene a presión las bebidas carbónicas.

En Hierve el Agua, las fracturas de la roca proporcionan vías de escape por donde emerge rápidamente hasta la superficie el agua subterránea. Esta rápida emersión provoca la descompresión súbita del gas. El agua hace efervescencia espontáneamente, liberando grandes burbujas de gas que provocan pequeños géiseres; el agua del manantial se agita como si hirviera. El dióxido de carbono en disolución es responsable también de la acidez del agua del manantial, que descompone el lecho rocoso, predominantemente calcáreo. La caliza, lo mismo que el travertino del valle de Tehuacán, está compuesta por calcita. El agua del manantial de Hierve el Agua contiene en disolución concentraciones elevadas de iones de calcio y de bicarbonato. Por este motivo, las capas de travertino depositadas por el agua han preservado los registros arqueológicos de Hierve el Agua de forma muy similar a como hicieron en el valle de Tehuacán.

Un lugar donde el agua fría parece hervir tuvo que despertar la curiosidad de los habitantes de la región, que descubrieron que podían utilizar el agua para regar durante meses, cuando pasados los monzones faltaba la lluvia. Sin embargo, las pronunciadas pendientes justo debajo del manantial no tienen la capa de tierra necesaria para el cultivo, por lo que los agricultores movieron a brazo cinco millones de metros cúbicos de tierra hasta aquel lugar y prepararon casi dos kilómetros cuadrados de huertos en terrazas. Todo indica que debieron de seleccionar la tierra cuidadosamente, tamizándola incluso, con el fin de preparar una textura uniforme y porosa que mejorara el drenaje. Construyeron las terrazas colocando a través de las pendientes desnudas muretes de retención regularmente espaciados, hechos con piedras montadas en seco. Después llenaron de tierra las cavidades definidas por la ladera y las paredes, creando estrechas terrazas a nivel con el borde del murete. Por último, construyeron pequeños canales que discurrían por lo alto de los muretes. En total, construyeron y mantuvieron más de 6500 metros de canalización.



5. SE CREE QUE LA PRESA DE PURRON (*en la parte inferior derecha de la fotografía*) es la mayor estructura de retención de aguas construida en América antes de la llegada de los europeos. La construcción comenzó en 750 a.C. y continuó intermitentemente hasta alrededor del año 1150 de nuestra era. En esa época la presa se alzaba casi 25 metros y tenía una longitud de unos 400 metros. El hombre que vemos frente a la erosionada cara sur de la presa (*fotografía de la derecha*) mide más de 1,80 m.

CORTESIA DE JAMES A. NEELY

Los canales de los muretes tenían una leve inclinación, lo que permitía derivar agua desde otros canales de suministro, mucho mayores, que corrían directamente ladera abajo desde los manantiales. Otros pequeños canales conectaban los extremos de salida de los canalillos de los muretes y conducían el agua hacia las terrazas situadas más abajo, o devolvían flujo a los canales de suministro. Al pasar el agua por un canal de murete, se remansaba en pequeños cuencos circulares, los *pocitos*, situados cada pocos metros a lo largo del lecho del canal. Los agricultores extraían a mano, mediante pequeños recipientes, el agua de riego para las plantas situadas en una u otra de las terrazas adyacentes. Este tipo de riego se denomina *riego a brazo*; se sigue practicando en la región.

Una inspección atenta de las terrazas y los canales permite apreciar el ingenio con que fueron concebidos. Gracias al espaciamiento regular y la estrechez de las terrazas se reducía la cantidad de tierra necesaria para crear cada terraza, mientras que la inmediata proximidad de los canalillos de los muretes y los pocitos permitía regar sin demasiado esfuerzo. Incluso en las pendientes más pronunciadas, donde la altura de los muros de retención podía ser de hasta 2,4 metros, la anchura de las terrazas se mantenía bastante constante. La mayoría tenían entre 2,4 y 3 metros de anchura, medida conveniente, pues corresponde a dos veces la envergadura de una persona de estatura comprendida entre 140 y 170 cm; como hacen ver los restos óseos de la región, ésas eran las estaturas normales de los antiguos campesinos. En la base de cada terraza se hacían pequeños orificios para facilitar el drenaje y la recaptación de la humedad del suelo. El riego a brazo y el adecuado drenaje eran de gran importancia, por estar el agua muy mineralizada. Si la cantidad de agua fuese excesiva o no tuviese un drenaje correcto se producirían rápidamente concreciones calcáreas, la tierra dejaría de ser porosa y se endurecería demasiado para trabajarla a mano o para permitir el crecimiento de las raíces.



CORTESIA DE JAMES A. NEELY

El flujo de agua se reconducía sin cesar por toda la red de canales; llegaba agua sólo a los canalillos de muro donde fuera necesaria en cada momento. En consecuencia, ninguno de estos canales llevaba por sí solo agua suficiente para convertirse en una gran *teacoatl*. Quedaban revestidos, eso sí, de una delgada capa de travertino, que ha preservado muchos de los detalles de su construcción. Particularmente interesante es la ausencia de compuertas o huecos por donde se hubiera podido desviar el agua desde los canales hacia las terrazas en cantidad grande: esas inundaciones habrían dejado las terrazas cubiertas de costras de travertino o infiltradas por ese mineral al cabo de unas pocas aplicaciones. Los agricultores, al adoptar un método de regadío tan eficiente, redujeron la acumulación de minerales en la tierra, al tiempo que minimizaban la cantidad de agua necesaria para la vida de las plantas de cada terraza; aumentaron así la superficie total de irrigación.

El riego se practicaba casi exclusivamente en la estación seca. Durante el resto del año, el agua de la lluvia contribuía a limpiar el suelo poroso de los minerales acumulados. Este proceso se facilitaba por la descomposición del material orgánico contenido en el mantillo de la terraza. Tal materia orgánica pudo haber estado compuesta, además de los rastrojos no recolectados, por excrementos humanos y otros desechos domésticos, que se mezclaban con la tierra de forma sistemática para mantener la fertilidad del suelo.

También encontramos que se utilizaron restos domésticos para corregir el suelo: hay fragmentos de cerámica de distintas épocas enterradas en la tierra de las terrazas, en orden cronológico, desde el fondo hacia lo alto del relleno. En ocasiones resulta posible la datación directa de los recipientes de cerámica mediante técnicas de radiocarbono; o la indirecta, por sus formas, motivos y colores, si es de un tipo que ha sido hallado antes en un yacimiento de cronología establecida. Además de proporcionar un registro del proceso de eliminación de desechos, la cerámica de Hierve el Agua ofreció el beneficio arqueológico adicional, no pretendido, de definir cuáles eran los tipos de recipientes utilizados a diario y, por consiguiente, con mayor probabilidad de que se rompieran. Pudimos saber así que los trabajadores del campo se deshacían de desperdicios que incluían tanto cerámicas bastas de uso diario como otras "vajillas" más finas, mientras que los recipientes de gran calidad se encontraron solamente en un pequeño templo allí erigido.

Los orígenes de una técnica

A primera vista, el establecimiento repentino de un sistema de regadío a gran escala tan desarrollado resulta desconcertante. Pero la ausencia aparente de precursores más modestos obedece, en realidad, a huecos en el registro arqueológico. En 1993 descubrimos el que posiblemente sea el pozo de agua más antiguo del Nuevo Mundo. Tal hallazgo nos revelaba que la administración del agua pudo haber tenido unos albores, aunque fueran embrionarios, mucho más antiguos de lo que hasta entonces se suponía. Debió de ser excavado hace unos 10.000 años. Con una profundidad de unos 5 metros respecto al primitivo nivel del suelo y un diámetro de 10, quedó posteriormente enterrado. Pudo haber estado en servicio durante unos 2000 años. El pozo se encuentra en San Marcos Necoxtla, pueblo del valle de Tehuacán; precedió a la implantación de la agricultura en el Nuevo Mundo. Aunque lo más probable es que no se utilizara para el riego, sí da prueba de que la gestión hidráulica en esta región comenzó muy pronto.

No hemos encontrado ejemplos de construcciones hidráulicas en los siglos que median entre la excavación de este pozo y los primeros canales que se han descubierto, cuya antigüedad se remonta unos 3000 años. Durante ese período se excavaron, a buen seguro, pozos más pequeños, represas para desviar agua de los riachuelos y otros sistemas sencillos de aprovisionamiento de agua. Los cultivos más antiguos debieron de recurrir al acarreo manual del agua o a regadíos de pequeña escala mediante canales que no se han conservado o no se han descubierto todavía.

Pero cómo lograron los primeros ingenieros hidráulicos de México trazar, en un suelo irregular, rutas de canalización de muchos kilómetros de longitud, manteniendo gradientes descendentes de menos de dos grados. Una construcción tal sería imposible en nuestros días sin instrumental topográfico de precisión. Los antiguos egipcios se valieron de niveles y de barras calibradas para la visualización de grandes distancias. Aunque tales métodos e instrumentos, sencillos pero eficaces, pudieron estar al alcance de los ingenieros mexicanos, carecemos de pruebas directas de que así fuera.

Disponemos de una respuesta parcial acerca de la planificación del sistema de canales. En una remota localidad del valle de Tehuacán, hay una línea de piedras redondeadas que se aleja de un pronunciado recodo de una *tecoatl*. Esta línea se prolonga pendiente abajo por la cara más corta de una cárcava abierta en una loma y sube por la otra cara hasta un punto ligeramente más elevado, que da a un valle sin canales.

La línea de piedras pudo haber sido un "anteproyecto" para la futura construcción de un canal. Para que el agua alcanzase la cara opuesta de la cárcava, se habría tenido que realzar la *tecoatl* existente en al menos un metro, antes de construir el nuevo ramal. Si se hubiera confiado en la acreción normal de travertino, se habría cumplido el objetivo en un siglo; en ese momento los descendientes de los campesinos que empezaron la obra podrían ya añadir al sistema otro campo de regadío.

Otra de las muchas cuestiones que apasionan a los arqueólogos es la de si estos proyectos fueron desarrollados por usuarios individuales o por una autoridad central. En los años cincuenta, Karl A. Wittfogel formuló la hipótesis de que la explotación y la distribución del agua a gran escala constituían etapas esenciales para el surgimiento de civilizaciones en cualquier parte del mundo. De acuerdo con tal postulado, sólo las "sociedades hidráulicas" alcanzaron los rasgos que caracterizan a una cultura avanzada, entre ellos una agricultura permanente, la diversidad económica, la confección y mantenimiento de registros documentales y la administración jerarquizada. Una sociedad hidráulica se civilizaba porque una fuente de agua fiable proporcionaba el incentivo y la capacidad para civilizarse.

Pero también parece implícita la proposición recíproca: la construcción y mantenimiento de una extensa infraestructura de gestión del agua podría exigir la atenta mirada de un estado bien organizado.

Otras investigaciones han puesto en entredicho ambas proposiciones, señalando que pequeñas entidades sociopolíticas, de laxa organización, podrían construir y gestionar sistemas hidráulicos, de modesta escala cuando menos, tal vez en cooperación con organizaciones vecinas similares, sin requerir ninguna autoridad central.

Existen pruebas que respaldan una y otra interpretaciones. Los regadíos modernos del valle de Tehuacán, por ejemplo, están gestionados por sociedades del agua cooperativas, no gubernamentales, que se remontan a tradiciones nativas. Incluso en nuestros días, estos derechos de regadío, sumamente codiciados, suelen tener origen hereditario, práctica que puede seguirse hasta tiempos precoloniales en los códices aztecas y en los primeros documentos españoles. Cada una de las pequeñas comunidades es responsable del adecuado uso y mantenimiento de su parte de un sistema más amplio de canales, pero la gestión general se efectúa por consenso entre las diversas comunidades asociadas. Así pues, el sistema funciona tanto local como colectivamente.

El debate sobre la forma en que las sociedades antiguas construyeron y gestionaron sus infraestructuras hidráulicas sigue abierto. No cabe duda alguna, sin embargo, de que el sistema del México meridional sobresale como una maravilla de la ingeniería y que se cuenta entre los máximos logros de los constructores prehistóricos de cualquier parte del mundo.

Los autores

S. Christopher Caran y James A. Neely comparten desde antiguo un permanente interés por los sistemas prehistóricos de gestión del agua en México y en el Suroeste de los EE.UU. Caran ha sido geólogo de la Universidad de Texas en Austin; en la actualidad preside Quarternary Analysis Laboratories, en Austin. Neely es profesor emérito del departamento de antropología de la Universidad de Texas en Austin; descubrió en los años sesenta y setenta la mayor parte de los sistemas de control del agua mencionados en este artículo. Desde entonces los ha estado investigando, en parte con Caran, a partir de 1988.

Bibliografía complementaria

THE KEEPERS OF WATER AND EARTH: MEXICAN RURAL ORGANIZATION AND IRRIGATION. K. I. Enge y Scott Whiteford. University of Texas Press, 1989.

IRRIGATED AGRICULTURE AT HIERVE EL AGUA, OAXACA, MEXICO. J. A. Neely et al. en *Debating Oaxaca Archaeology*, recopilación de J. Marcus. University of Michigan, Museum of Anthropology, Anthropological Papers n.º 84, 1990.

A LATE PALEO-INDIAN/EARLY ARCHAIC WELL IN MEXICO: POSSIBLE OLDEST WATER-MANAGEMENT FEATURE IN THE NEW WORLD. S. C. Caran et al. en *Geoarchaeology: An International Journal*, vol. 11, n.º 1, págs. 1-36, enero de 1996.

A CONTEXTUAL STUDY OF THE "FOSSILIZED" PREHISPANIC CANAL SYSTEMS OF THE TEHUACÁN VALLEY, PUEBLA, MEXICO. J. A. Neely en *Antiquity*, vol. 75, n.º 289, págs. 505-506; 2002.



1. DIEZ SEGUNDOS DESPUES DE LA IGNICION, una llamarada termonuclear está a punto de terminar la incineración de una estrella enana blanca, según muestra esta simulación. En su barrido desde las profundidades del astro, una cadena de reacciones nucleares ha transformado el carbono y el oxígeno (*lila, rojo*) en silicio (*naranja*) y hierro (*amarillo*). Las simulaciones anteriores, que no incorporaban los movimientos turbulentos, no podían explicar por qué las estrellas explotan, en vez de morir tranquilamente.



PAT RAWLINGS *SAIC*

SUPERNOVAS

No estalla fácilmente una estrella. Los modelos por ordenador habían sido hasta ahora incapaces de reproducir sus inmensas explosiones

Wolfgang Hillebrandt, Hans-Thomas Janka y Ewald Müller

El 11 de noviembre de 1572, el astrónomo danés Tycho Brahe observó una nueva estrella en la constelación de Casiopea, que brillaba con la intensidad de Júpiter. En más de un sentido, así nació la astronomía moderna, pues el fenómeno refutaba la estabilidad e inmutabilidad de los cielos. Estas "estrellas nuevas" no han dejado de sorprender desde entonces. Cuatrocientos años más tarde, sabemos que su brillo sobrepasa durante unos instantes el de miles de millones de estrellas normales. Se trata, pues, de explosiones grandiosas. En 1934, Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, acuñó la palabra "supernova". Amén de espectaculares, desempeñan funciones singulares en el universo y en el trabajo de los astrónomos. Siembran el espacio de elementos pesados, regulan la formación de las galaxias y su evolución y sirven de hitos de la expansión cósmica.

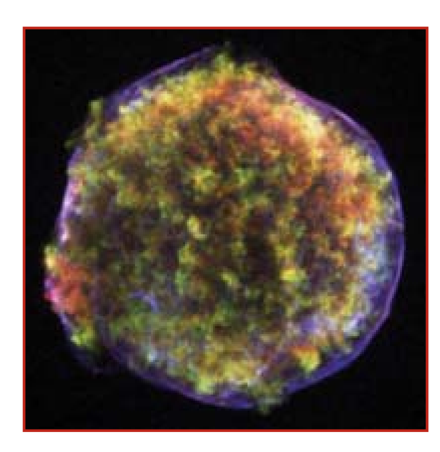
Zwicky y Walter Baade conjeturaron que la energía de esas explosiones procede de la gravedad. Una estrella normal implosiona, se desploma, hasta que el núcleo alcanza la densidad de un núcleo atómico. A la manera de un jarrón de cristal que golpea contra hormigón, el material que colapsa libera energía potencial gravitatoria suficiente para que explote el resto de la estrella. En 1960 Fred Hoyle, de la Universidad de Cambridge, y Willy Fowler, del Caltech, ofrecieron una explicación distinta: las explosiones constituían bombas nucleares inmensas. Cuando una estrella de tipo solar ha consumido ya su hidrógeno, y tras el hidrógeno el helio, sigue con el carbono y el oxígeno. Las reacciones de fusión de estos elementos no sólo liberan un pulso de energía gigantesco, sino que producen además níquel 56 radiactivo, cuya desintegración gradual explica el brillo residual que despide la explosión y perdura durante meses.

Ambas ideas son correctas. De las supernovas que no presentan signos de hidrógeno en sus espectros (las de tipo I), la mayoría (el tipo Ia) parecen ser explosiones termonucleares; el resto (tipos Ib y Ic) se debe al colapso gravitatorio de estrellas que se habían desprendido de sus capas exteriores de hidrógeno. Las supernovas con espectros que muestran hidrógeno (tipo II) podrían también originarse en un colapso. Lo mismo el mecanismo termonuclear que el gravitatorio reducen una estrella entera a un caparazón de escombros gaseosos. El colapso gravitatorio deja tras de sí una estrella de neutrones hiperdensa o, en casos extremos, un agujero negro. Las observaciones, sobre todo de la supernova 1987A (un suceso de tipo II), han respaldado este esquema básico [*véase* "La gran supernova de 1987", por Stan Woosley y Tom Weaver; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1989].

Con todo, la explicación pormenorizada de una supernova constituye todavía uno de los principales desafíos planteados a la astrofísica. A las simulaciones por ordenador les cuesta reproducir las explosiones, por no hablar de acotar sus propiedades. Resulta harto complicado hacer estallar una estrella. Las estrellas se regulan por sí mismas y permanecen estables durante millones de años, incluso miles de millones. Hasta las estrellas muertas o moribundas cuentan con mecanismos que las van apagando e impiden que estallen. Dilucidar cómo se superan estos mecanismos de regulación requiere simulaciones multidimensionales que llevan a las computadoras al límite de sus posibilidades, y aun más allá. Pero la situación acaba de empezar a mejorar.

La dificultad de estallar

Aunque resulte paradójico, el tipo de estrellas que estallan como supernovas de tipo Ia es un dechado de estabilidad: las enanas blancas. Una enana blanca es el residuo inerte de una estrella de tipo solar. Si no se la perturba, una enana blanca permanecerá en el estado en que nació; se irá enfriando y apagándose paulatinamente. Pero Hoyle y Fowler argumentaron que si una enana blanca orbita muy cerca de otra estrella, atraerá hacia sí materia de su compañera, aumentará su masa y comprimirá su núcleo hasta alcanzar densidades y temperaturas muy altas, a las que carbono y oxígeno se fusionan de manera explosiva.



2. LA SUPERNOVA DE TYCHO, una explosión termonuclear observada por el célebre astrónomo danés Tycho Brahe en 1572, dejó tras de sí una nube de silicio, hierro y otros elementos pesados que brillan en rayos X (*verde, rojo*). El frente de choque (*fina capa azul*) se expande a una velocidad de 7500 kilómetros por segundo.

Las reacciones termonucleares deberían comportarse como el fuego ordinario. El frente de llamas debería atravesar la estrella y dejar tras de sí una acumulación de cenizas nucleares (de níquel, sobre todo). Las reacciones de fusión ocurrirán en cualquier momento en volúmenes muy pequeños, con mayor probabilidad en la superficie de las burbujas llenas de ceniza que flotarían en las profundidades de la enana blanca. Por su baja densidad, las burbujas tenderían a ascender hacia la superficie de la estrella, a imagen de las burbujas de vapor en un puchero de agua hirviendo.

El punto débil de este modelo estriba en la extinción de la llama nuclear. La energía liberada provoca que la estrella se expanda y enfríe; por tanto, el incendio debería cesar. A diferencia de una bomba común, la estrella carece de paredes o vallas que la confinen y eviten semejante autoextinción.

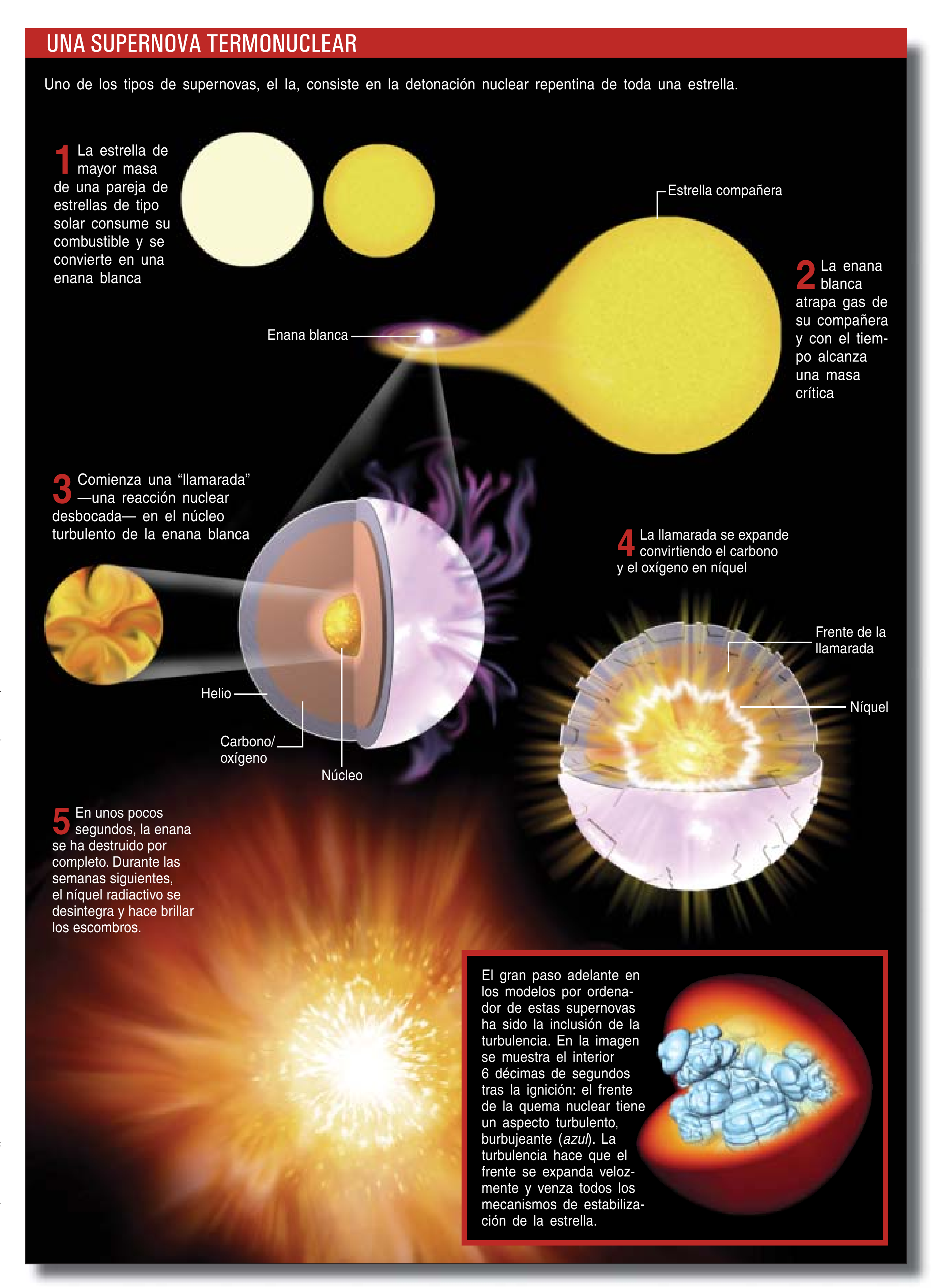
A este traspié teórico se une una complicación práctica. Las condiciones que se dan en una supernova no pueden reproducirse en el laboratorio. Las observaciones están sujetas a sus propias limitaciones. La mejor aproximación con la que puede contar un astrofísico es la simulación de la explosión en una computadora. Una tarea que impone. En la actualidad, las simulaciones más precisas, obtenidas por nuestro grupo con un superordenador IBM p690, dividen la estrella en una red de 1024 elementos por lado, para registrar detalles de apenas unos kilómetros de diámetro. Una sola ejecución del código requiere varias veces 10^{20} operaciones aritméticas. Para abordar un cálculo de tamaña complejidad, el superordenador realiza sólo del orden de 10^{11} operaciones por segundo: la tarea lleva casi 60 años de procesador.

Los trucos informáticos que simplifican las simulaciones en otras áreas del conocimiento no se aplican a las supernovas, donde hay flujos muy asimétricos, las condiciones son extremas e interviene un amplio rango de escalas espaciales y temporales. La física de partículas, la física nuclear, la dinámica de fluidos y la relatividad general, complicada cada

Resumen/Supernovas

- Las estrellas son, en pleno derecho, cuerpos estables. Prefieren una muerte discreta. No resulta fácil entender por qué algunas se convierten en supernovas. Estas explosiones se resisten a las descripciones sencillas y a las simplificaciones. Pocos fenómenos astrofísicos habrá más complejos.
- Se han elaborado modelos más refinados, que últimamente han conseguido reproducir dos de los principales tipos de supernovas. La clave reside en la descripción de las tres dimensiones espaciales con un detalle capaz de registrar la dinámica de las corrientes turbulentas.
- Los nuevos modelos han descubierto que las explosiones pueden ser asimétricas. Agitan y mezclan a fondo los residuos de la explosión (entre los que se encuentran los nuevos elementos químicos sintetizados). La estrella de neutrones que la explosión deja tras de sí sale disparada por la galaxia a una velocidad celerísima.

NASA/CXC/JESSICA WARREN, JOHN P. HUGHES ET AL. *Universidad de Rutgers*



DON DIXON (*ilustraciones*); WOLFGANG HILLEBRANDT Y FRIEDRICH ROEPKE *Instituto Max Planck de Astrofísica* (*simulación*)

una por su propia naturaleza, han de tomarse en cuenta todas a la vez en una simulación de supernova.

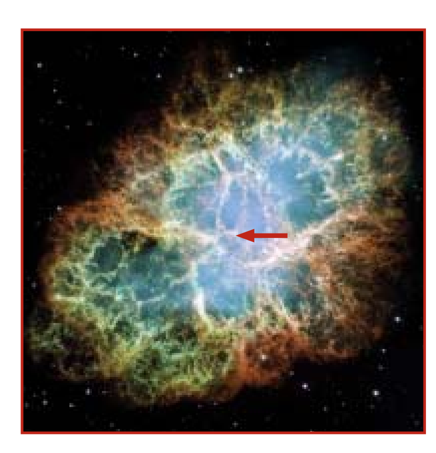
En el motor

La solución procede de un área inesperada, la física de los motores de los coches. La mezcla y la ignición de gasolina y oxígeno en un motor genera turbulencia. La turbulencia, a su vez, aumenta el área superficial de las llamas al arrugarlas y estirarlas. El ritmo de consumo del carburante, proporcional a la superficie en llamas, crece. Una estrella también es turbulenta por naturaleza. Puesto que el gas se desplaza distancias gigantescas a velocidades altas, cualquier perturbación pequeña convierte presto un flujo suave en un flujo turbulento. En una supernova, al remover el material las burbujas calientes que ascienden, se extiende la quema nuclear tan deprisa, que la estrella no tiene tiempo de contrarrestar el efecto.

En un motor de combustión interna que opere bien, la llama se propaga a una velocidad subsónica limitada por el ritmo de difusión del calor por el material: un proceso de deflagración. En un motor con mala combustión, la llama se propaga a velocidad supersónica mediante una onda de choque que atraviesa, y comprime, la mezcla de carburante y oxidante: un proceso de detonación. Las llamas termonucleares pueden expandirse de ambas maneras. La detonación, más violenta, incinera la estrella por completo, dejando sólo los elementos finales de la cadena de fusión, como el níquel y el hierro. Sin embargo, la observación astronómica detecta elementos muy dispares en las explosiones, entre ellos el silicio, el azufre y el calcio. El fenómeno viene a indicarnos que la combustión nuclear se propaga, al menos en un principio, como una deflagración.

En los últimos años, nuestro grupo y otros equipos de la Universidad de California en Santa Cruz y de la Universidad de Chicago han creado modelos informáticos convincentes sobre deflagraciones termonucleares. El código que hemos perfeccionado se basa en métodos desarrollados en meteorología y para el estudio de la combustión química. La turbulencia es un proceso tridimensional. En una cascada turbulenta, la energía cinética pasa de grandes a pequeñas escalas de longitud, donde se disipa en forma de calor. En otras palabras, en el flujo se definen patrones de finura creciente. Por lo tanto, las simulaciones han de ser tridimensionales también. Sólo desde hace poco resulta ello posible.

La simulación de supernovas en todas sus dimensiones ha descubierto complejas estructuras con forma de hongo: se trata de burbujas calientes que emergen de los fluidos estratificados; la turbulencia las arruga y estira. El aumento del ritmo de fusión implícito en la turbulencia conduce al resquebrajamiento de la enana blanca en apenas unos segundos. Los escombros se expanden a alrededor de 10.000 kilómetros por segundo, en buen acuerdo con las observaciones.



3. LA NEBULOSA DEL CANGREJO es el residuo gaseoso de una supernova, observada en 1054, que se originó por el colapso de un núcleo estelar. En el centro se encuentra una estrella de neutrones (*flecha*); despide partículas que hacen brillar el gas (*azul*). Los filamentos exteriores están formados por hidrógeno y helio procedentes de la estrella original, de gran masa.

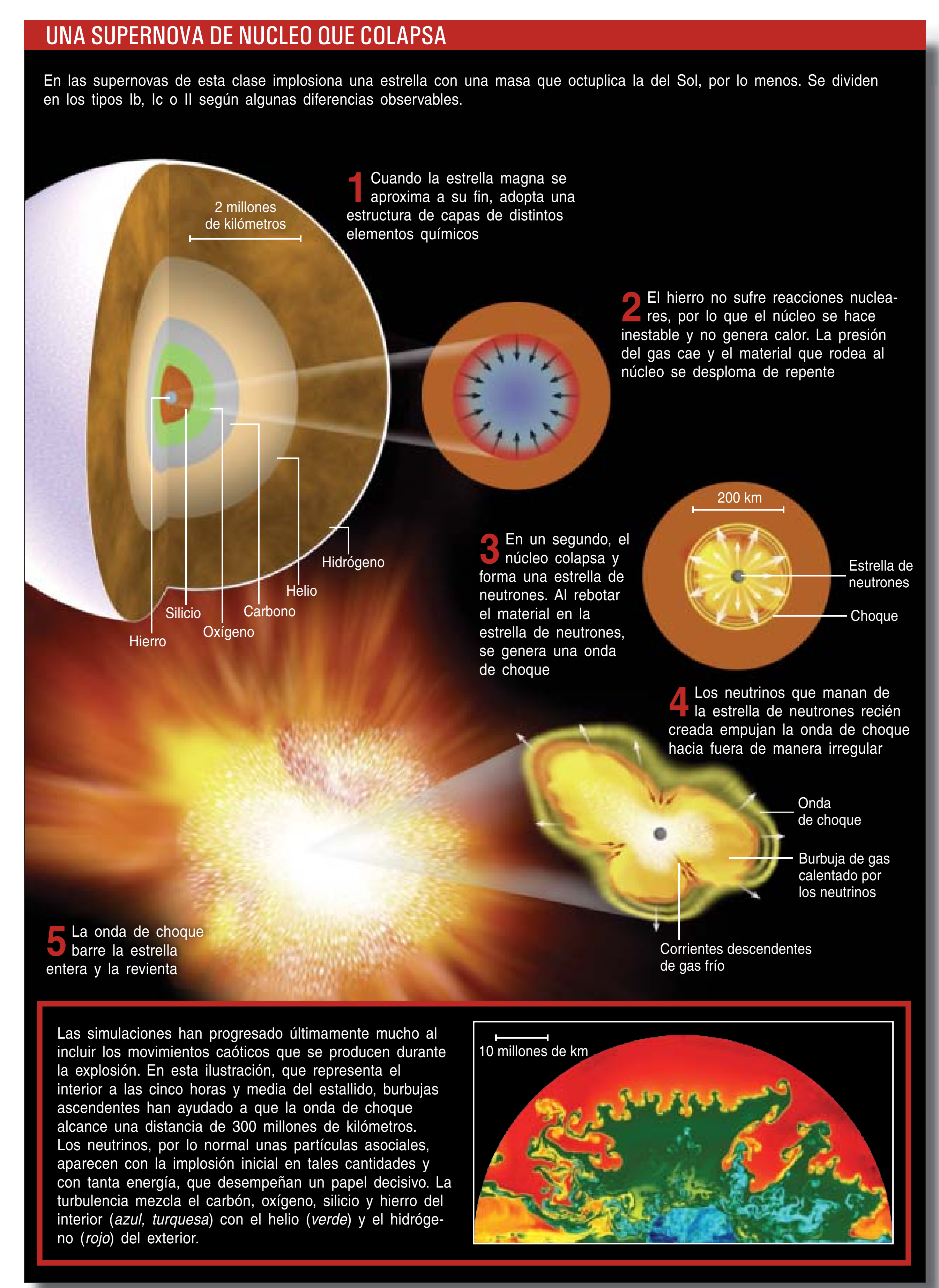
NASA/ESA/ALLISON LOLL Y JEFF HESTER *Universidad estatal de Arizona*

Pero aún quedan pendientes muchas cuestiones. Se desconoce qué pone en marcha la ignición de la enana blanca. Otro problema es que la deflagración debería expulsar una fracción importante de enana blanca casi inalterada; las observaciones, en cambio, sugieren que sólo una pequeña parte de la estrella, a lo sumo, permanece sin cambios. Por tanto, la explosión no puede ser sólo pura deflagración; debe haber también detonación. Los teóricos han de explicar aún por qué intervienen los dos procesos. Tampoco saben justificar la variedad que se ha observado en las explosiones. Tal vez el acrecimiento de material sobre la enana blanca no constituya la única manera de generar una supernova de tipo Ia; la fusión de dos enanas blancas podría resultar otra.

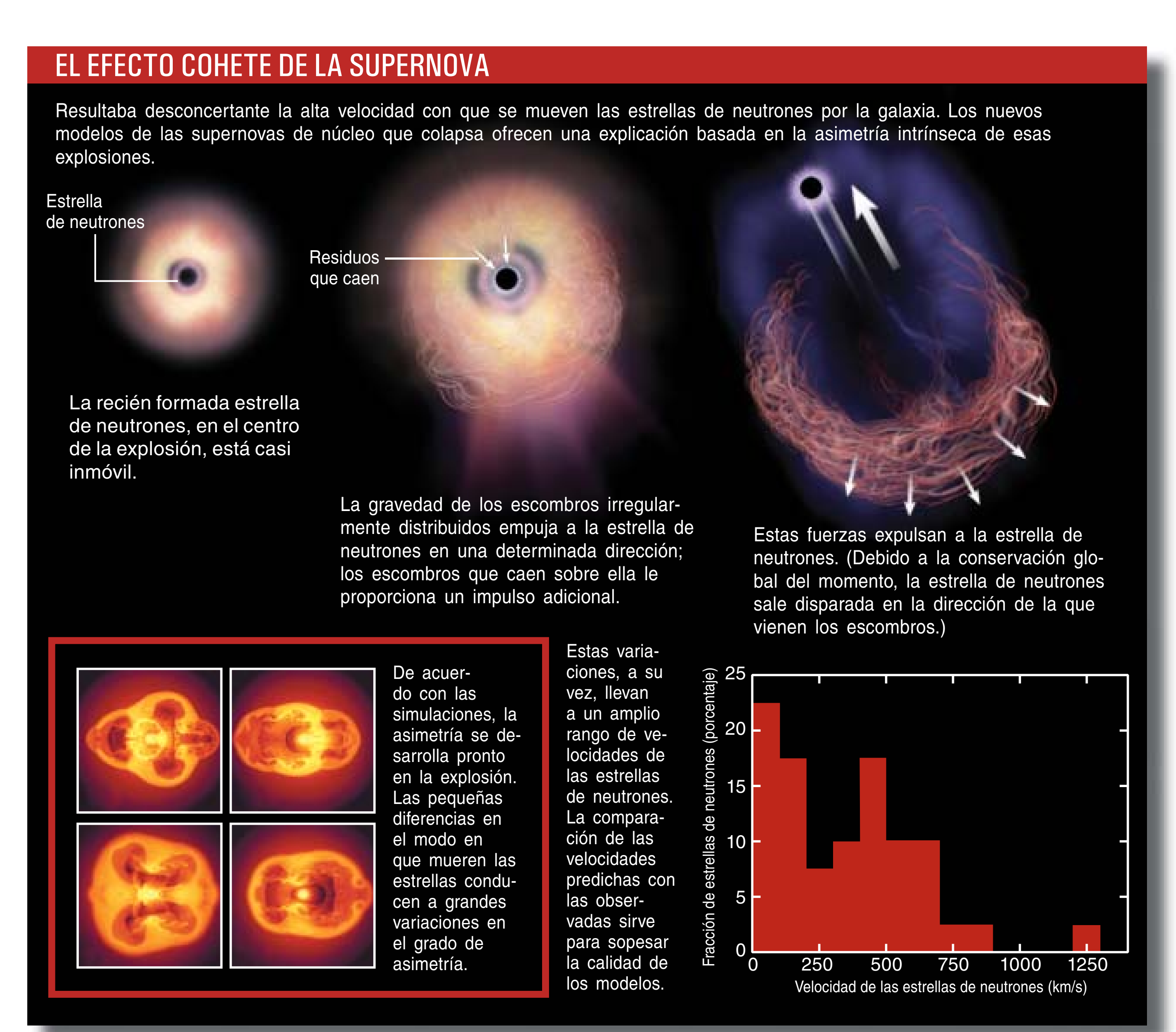
La tumba gravitatoria

Cuesta aún más entender el otro tipo de supernovas, las originadas por el colapso del núcleo estelar. Para la observación, ofrecen mayor variedad que las supernovas termonucleares: algunas tienen hidrógeno, otras no; algunas explotan en un entorno interestelar denso, otras en un espacio casi vacío; algunas expulsan grandes cantidades de níquel radiactivo, otras no lo expulsan. El rango posible de las energías y las velocidades de expansión en estas explosiones es enorme. Las supernovas más poderosas no sólo producen la clásica explosión, sino también estallidos de rayos gamma de larga duración [*véase* "Las explosiones más brillantes del universo", por Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2003]. En tamaña diversidad estriba una de las persistentes dificultades que plantean. A buen seguro, los elementos más pesados —oro, plomo, torio y uranio, que sólo pueden crearse bajo condiciones muy especiales— se originen en las supernovas de núcleo que colapsa. Pero no se sabe si tales condiciones se dan realmente cuando los núcleos de las estrellas se desploman.

Pese a la sencillez aparente de la idea básica del colapso del núcleo —la implosión libera energía gravitatoria, que expele materia—, no resulta fácil aprehender los pormenores. Al final de su vida, una estrella con una masa superior a unas diez veces la solar ha desarrollado una estructura de cebolla, con catafilos que contienen elementos cada vez más pesados. El núcleo está formado sobre todo por hierro y la estructura se sostiene por la repulsión cuántica de los electrones. Con el tiempo, no obstante, el peso de la estrella puede más que los electrones. Los empuja hacia los núcleos de los átomos, donde reaccionan con los protones para formar neutrones y neutrinos electró-



DON DIXON *(ilustraciones)*; KONSTANTINOS KIFONIDIS *Instituto Max Planck de Astrofísica (simulación)*



DON DIXON (*ilustraciones de arriba*); LEONHARD SCHECK *Instituto Max Planck de Astrofísica* (*simulaciones*); TINNI CHOWDHURY (*gráfica*)

nicos. Los neutrones y los protones restantes, a su vez, se juntan cada vez más, hasta que sus propias fuerzas repulsivas frenan el derrumbe.

En este punto, la implosión da marcha atrás, sin que sepamos la razón; se convierte en un poderoso derrame de materia. De las profundidades del pozo gravitatorio aflora de nuevo masa. En la teoría clásica, el impulso le viene de la onda de choque generada cuando las capas exteriores estelares chocan a velocidad supersónica contra el centro del núcleo, decelerado de repente. Esta onda se desplaza hacia el exterior comprimiendo y calentando la materia con que se va encontrando.

Pero, y ahí está el inconveniente, la onda de choque consume su energía y con el tiempo se estanca. Las simulaciones muestran que la energía de la implosión se disipa rápidamente. Entonces, ¿por qué se destruye a sí misma la estrella?

El germen de una posible respuesta se encuentra en el trabajo de Stirling Colgate y Richard White en 1966 y en las simulaciones de Jim Wilson, de principios de los años ochenta. (Los tres investigaban en el actual Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore.) Conjeturaron que no sólo por la onda de choque llega la energía del núcleo a las capas exteriores de la estrella; los neutrinos quizá desempeñen también una función crucial durante el colapso. En un principio, la idea parecía extraña: los neutrinos son muy poco sociables; interaccionan con otras partículas tan débilmente, que cuesta incluso detectarlos. Pero en una estrella que se desploma cuentan con energía suficiente para provocar una explosión; en condiciones de extrema densidad, reaccionan con la materia con mayor intensidad. Calientan una capa que rodea el núcleo de la supernova, con lo que la presión aumenta detrás de la onda de choque estancada.

El retroceso de una estrella de neutrones

¿Basta este empuje adicional para reavivar el choque, llevarlo afuera y completar la explosión? Las simulaciones por ordenador del proceso indicaban que no. Aunque el gas absorbe los neutrinos, también los emite. Según los modelos, dominaban las pérdidas y se frustraban las explosiones. Estos modelos teóricos, sin embargo, adoptaban una simplificación radical: suponían simetría esférica en la estrella. Ignoraban así fenómenos

multidimensionales, como la convección y la rotación, de vital importancia, ya que tras las supernovas se observan residuos muy enmarañados y alejados de la esfericidad.

Observación que parece encerrar la clave que resuelva el problema de las supernovas. Las simulaciones multidimensionales muestran que el plasma de la capa calentada por los neutrinos alrededor del núcleo interior de la supernova desarrolla burbujas flotantes y penachos con forma de hongo. La convección transporta la energía a la onda de choque, la impele hacia fuera y desencadena la explosión.

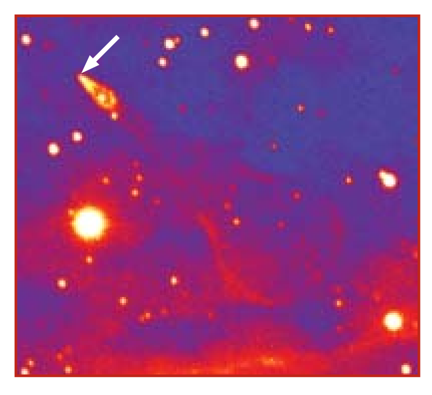
Este nuevo esquema tiene derivaciones muy atractivas. Cuando la explosión empieza despacio, las burbujas de plasma caliente que se expande, separadas por flujos descendentes de materia más fría, tienen tiempo de irse fusionando. Al final, el patrón de flujos consta de apenas unas pocas burbujas ascendentes, incluso de una sola, rodeada de corrientes que circulan hacia el interior. La consecuencia es una explosión "torcida", que da razón de la irregularidad sorprendente de los remanentes de las supernovas. Otra asimetría se debe a la posible deformación del frente de onda estancado, que confiere a la explosión una forma de reloj de arena. Aparecen otras inestabilidades en las corrientes cuando la onda revivida atraviesa en su emersión las capas de la estructura de cebolla de la estrella progenitora. Los elementos químicos sintetizados durante la vida de la estrella se mezclan con los originados en la explosión.

Puesto que los escombros estelares se expulsan con mayor intensidad hacia un lado, la estrella de neutrones que queda en medio se desplaza en dirección opuesta. Nuestro grupo ha encontrado velocidades de retroceso de más de 1000 kilómetros por segundo; concuerda con los movimientos observados de la mayoría de las estrellas de neutrones. Algunas estrellas de neutrones se mueven con mayor parsimonia; parece que las burbujas creadas por la explosión no tuvieron tiempo de fusionarse. Se configura de ese modo un cuadro unitario, donde una gran variedad de efectos se deben a un solo fenómeno subyacente.

Pese a los avances registrados en los últimos años, no hemos llegado a un modelo con realismo suficiente para mostrar en toda su riqueza lo que ocurre en una supernova. Las hipótesis esbozadas incorporan aproximaciones y simplificaciones. Un modelo completo tendría siete dimensiones: las espaciales (tres coordenadas), el tiempo, la energía de los neutrinos y su velocidad (descrita por dos coordenadas angulares). Más aún, incluiría los tres tipos, o sabores, de neutrinos. Hay un gran empeño mundial en crear ordenadores y programas que procesen modelos de esa naturaleza.

Uno de los propósitos principales es el de estudiar si existe más de un mecanismo desencadenante de las explosiones. Los campos magnéticos, por ejemplo, podrían aprovechar la energía rotacional de la recién formada estrella de neutrones y darle así un empuje extra a la onda de choque. Podrían también reagrupar la materia expulsada a lo largo del eje de rotación en dos flujos polares. Tales efectos explicarían las explosiones más energéticas. Los estallidos de rayos gamma, en concreto, parecen hallarse asociados a corrientes de materia que se mueven casi a la velocidad de la luz. El derrumbe del núcleo en una explosión de ese tipo podría engendrar, no una estrella de neutrones, sino un agujero negro.

A medida que los creadores de modelos van depurando sus propuestas, avanzan a su vez los observadores. Investigan dominios poco explorados. No buscan sólo radiación electromagnética, sino también neutrinos y ondas gravitatorias. El colapso de un núcleo estelar, su violenta quema al comienzo de la explosión y la posible transición hacia un agujero negro producen un intenso haz de neutrinos y sacuden el espaciotiempo. Al contrario que la luz, que se procesa intensamente en las capas superiores, estas otras señales escapan del cataclismo desatado sobre el centro de la explosión. Los nuevos detectores de neutrinos y de ondas gravitatorias quizás aporten muchas sorpresas relativas a la muerte de las estrellas.



4. LA NEBULOSA DE LA GUITARRA es una onda de choque. Procede de una estrella de neutrones (*flecha*) que se desplaza a 1600 kilómetros por segundo a través del gas. La explosión progenitora de la estrella debió de ser muy irregular para lanzarla a tal velocidad.

S. CHATTERJEE Y J. CORDES *Universidad de Cornell*

Los autores

Wolfgang Hillebrandt, Hans-Thomas Janka y **Ewald Müller** pertenecen al Instituto Max Planck de Astrofísica (MPA), en Garching. Comparten la labor investigadora con la docencia en la Universidad Técnica de Múnich. Hillebrandt es uno de los tres directores del MPA. Sus áreas principales de trabajo son la astrofísica nuclear, la evolución estelar y las explosiones supernova. Janka se interesa por la astrofísica de los neutrinos, la evolución de las estrellas de neutrones y las explosiones supernova y de rayos gamma. Müller dirige un grupo de investigación de astrofísica numérica y relativista.

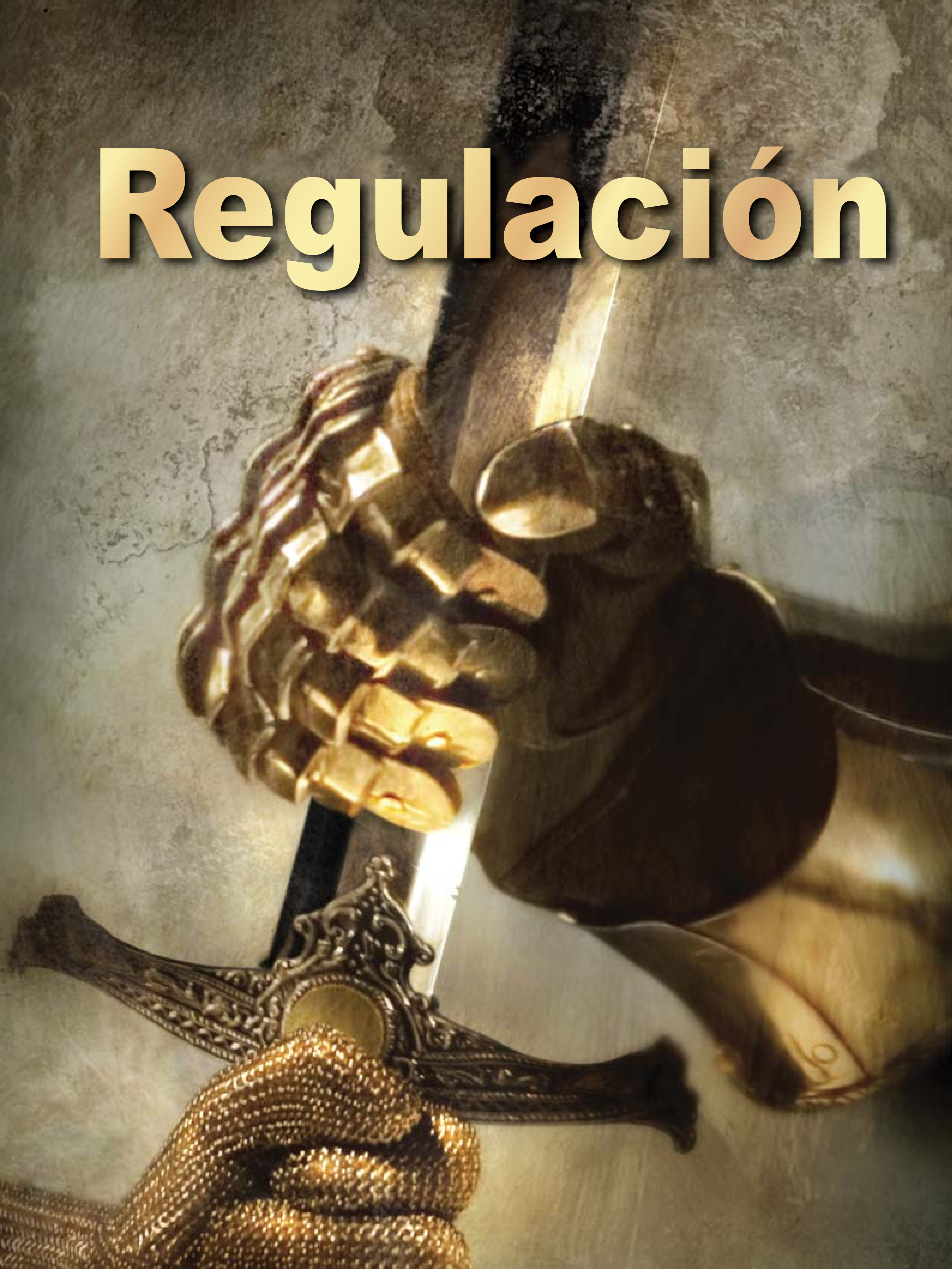
Bibliografía complementaria

SUPERNOVA EXPLOSIONS IN THE UNIVERSE. A. Burrows en *Nature*, vol. 403, págs. 727-733; 17 de febrero, 2000.

FULL-STAR TYPE IA SUPERNOVA EXPLOSION MODELS. F. K. Röpke y W. Hillebrandt en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 431, n.º 2, págs. 635-645; febrero 2005.

THE PHYSICS OF CORE-COLLAPSE SUPERNOVAE. S. Woosley y H.-Th. Janka en *Nature Physics*, vol. 1, n.º 3, págs. 147-154; diciembre 2005.

MULTIDIMENSIONAL SUPERNOVA SIMULATIONS WITH APPROXIMATIVE NEUTRINO TRANSPORT. L. Scheck, K. Kifonidis, H.-Th. Janka y E. Müller en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 457, n.º 3, págs. 963-986.


Regulación

de la AUTOINMUNIDAD

Las células T reguladoras evitan que las defensas del organismo ataquen al propio cuerpo. La manipulación de estas células daría lugar a nuevos tratamientos para la diabetes, el rechazo de órganos trasplantados y otros trastornos autoinmunitarios

Zoltan Fehervari y Shimon Sakaguchi

"Horror autotoxicus"

Hace un siglo, el bacteriólogo Paul Ehrlich acuñó con acierto esa expresión para describir un ataque del sistema inmunitario contra los propios tejidos del sujeto. Ehrlich introdujo —y bautizó— el concepto de autoinmunidad; en su opinión, se trataba de un mecanismo potencialmente activo que en condiciones normales se mantenía bajo control. Sin embargo, la comunidad médica no aceptó esa hipótesis de doble filo: la autoinmunidad tenía que ser intrínsecamente imposible; después de todo, ¿qué oscura senda de la evolución permitiría siquiera la posibilidad de hallarse sometido a una horrenda autodestrucción?

Pero, poco a poco, se fueron asociando diversas enfermedades misteriosas al "horror autotoxicus": entre ellas, la esclerosis múltiple, la diabetes dependiente de insulina (forma que ataca durante la juventud) y la artritis reumatoide. Se descubrió también que estas enfermedades derivaban del comportamiento rebelde de los linfocitos T del tipo CD4+ (leucocitos que maduran en el timo y presentan la molécula CD4). Las variantes normales de estas células operan como miembros del sistema inmunitario: son las responsables del despliegue armamentístico contra los microorganismos patógenos. En ocasiones, sin embargo, las células se vuelven contra el propio organismo.

A Ehrlich no le faltaba tampoco razón en otro punto. La investigación reciente ha identificado unas células que bloquean el comportamiento aberrante del sistema inmunitario. Se trata de las células T reguladoras, una subpoblación de las CD4+. Fundamentales para el mantenimiento de la armonía entre el sistema inmunitario y su hospedador, no se limitan a evitar la autoinmunidad: influyen también en las respuestas del sistema inmunitario ante agentes infecciosos, el cáncer, el trasplante de órganos y el embarazo.

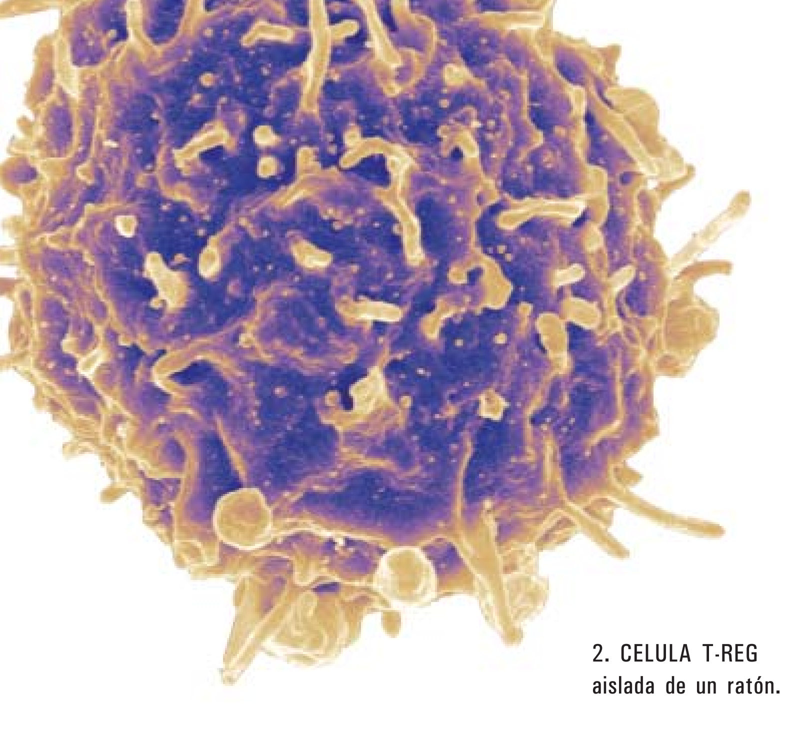
Nos proponemos averiguar el modo en que las células T reguladoras desempeñan sus funciones y por qué, a veces, yerran en su misión. Si descubriéramos vías de regular tales reguladores, se reduciría o intensificaría, según conviniera, la actividad inmunitaria; con ello, se abordarían en mejores condiciones los desafíos médicos presentados.

Defensas defectuosas

Igual que aconteció con los inmunólogos contemporáneos de Ehrlich, muchos se quedarían hoy consternados si se enterasen de que su cuerpo sano alberga células del sistema inmunitario potencialmente destructivas y con capacidad para desencadenar una enfermedad autoinmunitaria. La existencia de esta espada de Damocles inmunitaria se demuestra fácilmente. Inyectemos en un ratón proteínas de su

1. CUANDO EL SISTEMA INMUNITARIO esgrime sus armas de forma inapropiada, las células T reguladoras (T-reg) las doblegan.

CLIFF NIELSEN



2. CELULA T-REG aislada de un ratón.

propio sistema nervioso central junto con un adyuvante (una sustancia que estimula al sistema inmunitario en su integridad); le sobreviene una reacción inmunitaria destructiva. En un proceso que guarda semejanza con el que se desarrolla en la esclerosis múltiple, las células T lanzan un ataque sobre el cerebro y la médula espinal del animal.

El cambio del tipo de proteína propia inyectada provoca otras enfermedades autoinmunitarias en animales de laboratorio. De ello se infiere que hay células del sistema inmunitario potencialmente dañinas que organizan ataques sobre un amplio repertorio de tejidos propios. De ese riesgo no se exime el hombre; de la sangre de una persona sana podemos aislar células del sistema inmunitario autorreactivas que reaccionan con intensidad ante muestras de sus tejidos.

Entonces, ¿por qué la mayoría de los animales y seres humanos no se ven afectados por las enfermedades autoinmunitarias? En otras palabras, ¿cómo distingue de una amenaza (tal un patógeno) un tejido propio el sistema inmunitario? Las claves de la autotolerancia (la capacidad para abstenerse de atacar órganos del propio individuo) se hallan en las numerosas salvaguardias de que dispone el sistema inmunitario.

La primera defensa, al menos en lo que concierne a las células T, se organiza en el timo, situado enfrente del corazón. En el timo, las células T inmaduras reciben una "educación" estricta que las programa para no reaccionar con intensidad —y, por tanto, de forma perjudicial— contra ningún tejido del organismo. Las células rebeldes son destruidas. Mas ningún sistema es perfecto; hay células T autoagresivas que se salvan y llegan al sistema circulatorio y los vasos linfáticos. Crean, en el sistema inmunitario, el potencial para desencadenar una enfermedad autoinmunitaria.

En los vasos sanguíneos y linfáticos se alza una segunda barrera protectora ante la autoinmunidad. Abarca varias línea de defensa. Ciertos tejidos (los del cerebro y la médula espinal) se mantienen ocultos ante los patrulleros del sistema inmunitario por su característica escasez de vasos sanguíneos y linfáticos. No se trata, empero, de un aislamiento absoluto. En ocasiones, las células inmunitarias autorreactivas hallan una vía de entrada; sucede así cuando el tejido sufre una lesión.

Existen otros mecanismos de protección que ofrecen mayor seguridad. Las células del sistema inmunitario que muestran un interés inusual hacia los tejidos del propio organismo se marcan para su destrucción o se inactivan por medio de otros componentes del sistema inmunitario.

De entre las células inmunitarias que desempeñan estas funciones preventivas, las T reguladoras podría muy bien ser que revistan importancia primerísima. En su mayoría, si no todas, maduran en el timo, igual que el resto de las células T; luego abandonan esa glándula para extenderse por el cuerpo entero, donde operan como una subpoblación de células T especializadas.

El descubrimiento de los reguladores

Los hallazgos que apuntan hacia la existencia de las células T reguladoras se remontan a tiempos lejanos. En 1969, Yasuaki Nishizuka y Teruyo Sakakura, del Instituto de Investigación del Centro Aichi contra el Cáncer en Nagoya, demostraron que la extirpación del timo en hembras de ratón recién nacidas provocaba un efecto curioso: perdían los ovarios. Al principio se creyó que el timo segregaba alguna hormona necesaria para la supervivencia de los ovarios en desarrollo. Más tarde se descubrió, sin embargo, que las células del sistema inmunitario invadían los ovarios. La destrucción de los ovarios correspondía, por tanto, a una enfermedad autoinmunitaria que presumiblemente se había desatado por la disfunción de algún proceso regulador y capaz de contrarrestarla. Si en los múridos se inoculaban células T normales, se inhibía el trastorno autoinmunitario. Las células T se controlaban a sí mismas.

A principios de los años setenta, John Penhale, de la Universidad de Edimburgo, realizó observaciones análogas en ratas adultas. Richard Gershon, de la Universidad de Yale, propuso la existencia de una población de células T capaz de sofocar las respuestas inmunitarias, incluidas las autoagresivas. A ese hipotético componente del sistema inmunitario se le denominó célula T supresora.

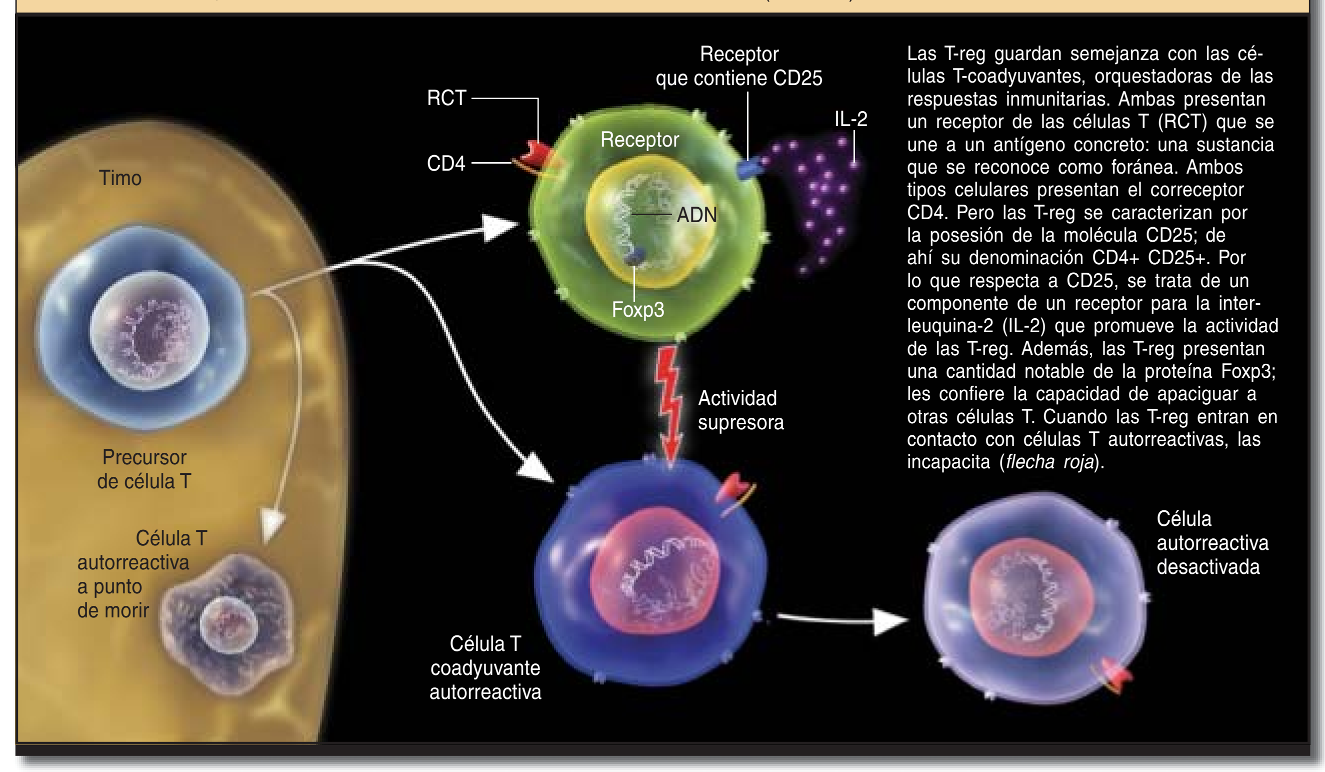
Resumen/Reguladores inmunitarios

- Durante años, los inmunólogos pusieron en duda la existencia de células supresoras de la actividad inmunitaria. Pero existen. Son las células T reguladoras, o T-reg.
- Las T-reg luchan contra la autoinmunidad. Ayudan al organismo a combatir las infecciones repetidas de un invasor recurrente, protegen a las bacterias que nuestro intestino necesita y mantienen el embarazo. Pero muestran su lado obscuro en su relación con las células cancerosas; posibilitan que se libren de los ataques del sistema inmunitario.
- Las investigaciones en curso prometen el desarrollo de terapias contra las enfermedades autoinmunitarias y el cáncer. Los nuevos tratamientos evitarían que los receptores de órganos trasplantados deban tomar de por vida fármacos inmunosupresores.

KIM J. HASENKRUG Y DAVID W. DORWARD

MECANISMOS DE TOLERANCIA

Las células T-reg aseguran que los componentes del sistema inmunitario (incluidas las células T que luchan contra las infecciones) se abstengan de atacar a los tejidos normales. El timo, donde maduran todas las variedades de células T, elimina muchas células con fuerte carácter autorreactivo (*izquierda*), pero su vigilancia no es perfecta; por ello las T-reg patrullan por el organismo en busca de rebeldes (*derecha*).



Las T-reg guardan semejanza con las células T-coadyuvantes, orquestadoras de las respuestas inmunitarias. Ambas presentan un receptor de las células T (RCT) que se une a un antígeno concreto: una sustancia que se reconoce como foránea. Ambos tipos celulares presentan el correceptor CD4. Pero las T-reg se caracterizan por la posesión de la molécula CD25; de ahí su denominación CD4+ CD25+. Por lo que respecta a CD25, se trata de un componente de un receptor para la interleuquina-2 (IL-2) que promueve la actividad de las T-reg. Además, las T-reg presentan una cantidad notable de la proteína Foxp3; les confiere la capacidad de apaciguar a otras células T. Cuando las T-reg entran en contacto con células T autorreactivas, las incapacita (*flecha roja*).

AMADEO BACHAR

Sin embargo, por aquel entonces ningún investigador halló ni una de esas células, ni pudo señalar un mecanismo molecular mediante el cual una célula inmunitaria refrenara a otra. En consecuencia, el concepto de célula T supresora se difuminó entre los márgenes de la corriente inmunológica dominante.

A pesar del ambiente desfavorable, algunos expertos persistieron en su empeño por identificar células T con capacidad para prevenir la respuesta autoinmunitaria. Esperaban encontrar alguna característica molecular reveladora en la superficie de las células en cuestión, un “marcador” que las distinguiera de otras células. A mediados del decenio de los ochenta se empezaron a investigar posibles marcadores.

En 1995, uno de los autores (Sakaguchi) identificó por fin un marcador de célula T supresora: la molécula CD25. Cuando se eliminaban, en ratones, las células T CD4+ que presentaban esa molécula, el tiroides, el estómago, las gónadas, el páncreas y las glándulas salivales eran objeto de un ataque autoinmunitario caracterizado por una inflamación espectacular; los leucocitos se dirigían en tropel hacia los órganos y los dañaban.

En un importante experimento de confirmación, se eliminaron, de las poblaciones de células T obtenidas a partir de ratones normales, las células T CD4+ y CD25+, que representaban sólo una pequeña fracción (el 10 por ciento como mucho) del total de células T. Las células T restantes se transfirieron a ratones transgénicos privados de sistema inmunitario propio. Esta maniobra desencadenaba una enfermedad autoinmunitaria. Cuanto más exhaustiva era la eliminación en los animales donantes, más amplio el espectro de enfermedades causadas en los receptores; una eliminación completa desencadenaba, con frecuencia, resultados fatales.

La reintroducción de células T CD4+ y CD25+, incluso en cantidades reducidas, confería una inmunidad normal y protegía a los animales de estas enfermedades. La hipótesis se confirmó también mediante experimentos *in vitro*. Quizá para despojar a las “células supresoras” de cualquier estigma, los inmunólogos comenzaron a denominarlas células T reguladoras CD25+ o, sencillamente, T-reg.

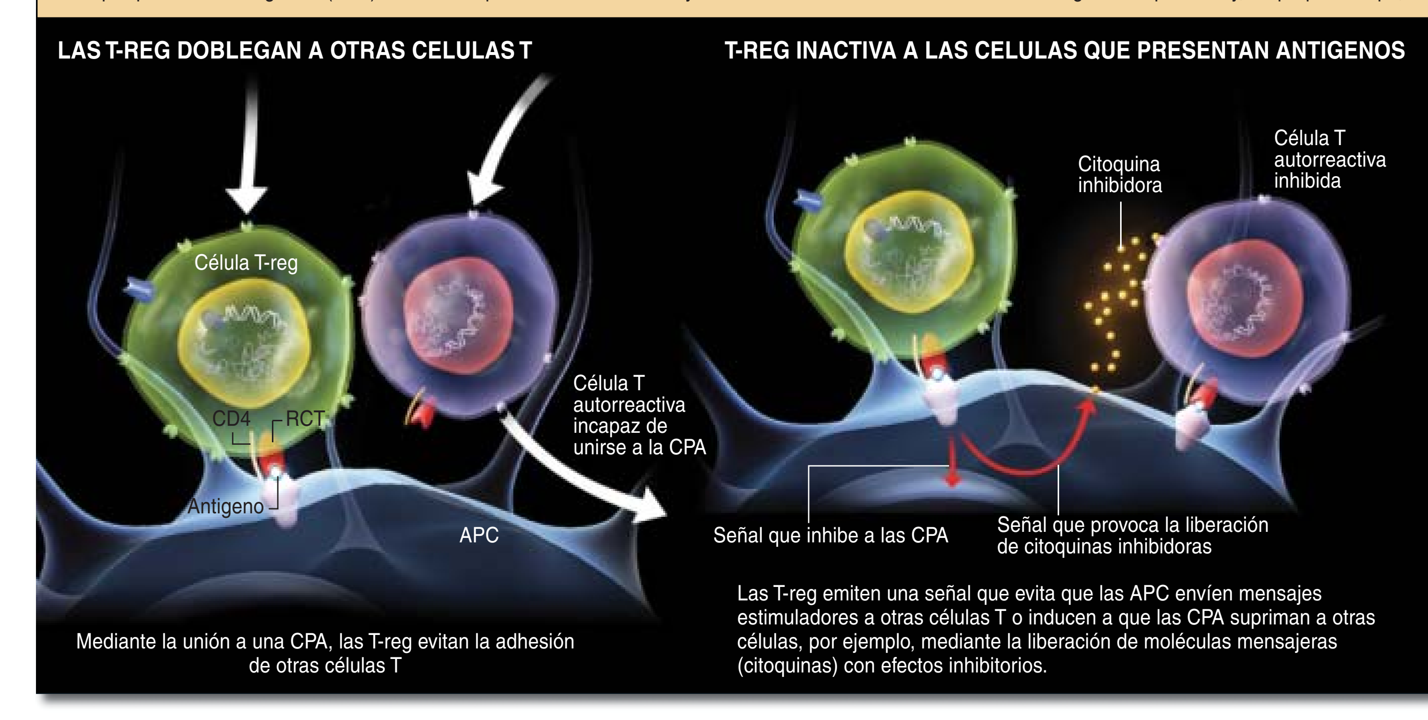
Así operan las T-reg

Los mecanismos mediante los cuales las T-reg suprimen la actividad autoinmunitaria siguen envueltos en el misterio, pese a las numerosas investigaciones a ellos consagradas. Las T-reg parecen reprimir a una amplia gama de células del sistema inmunitario e impiden su multiplicación y la secreción de señales químicas intercelulares (citoquinas). Los expertos coinciden en que las T-reg se activan por medio de contactos directos célula-célula. No se sabe mucho más.

Nuestro laboratorio de la Universidad de Kioto, el grupo de Alexander Rudensky, de la Universidad de Washington, y el equipo que dirige Fred Ramsdell, de la empresa CellTech en Bothell, llegamos por vías independientes al descubrimiento reciente de una pista sobre el modo en que se desarrollan y operan las T-reg. Las

¿COMO EVITAN LAS T-REG LA AUTOINMUNIDAD?

No se conoce todavía de qué modo las T-reg bloquean los ataques autoinmunitarios. Se barajan tres hipótesis, con un denominador común: la interferencia de una etapa crucial de la activación de la respuesta inmunitaria, mediante el envío de señales entre las células T y las células que presentan antígenos (CPA). Antes de que las células T coadyuvantes recluten nuevas tropas y antes de que las células T "citotóxicas" ataquen el tejido reconocido como infectado, las CPA deben mostrar los antígenos para que sean sometidos a escrutinio por parte de la célula. Si el receptor de la célula T (RCT) de una célula coadyuvante o citotóxica reconoce uno de los antígenos expuestos y, al propio tiempo,



Mediante la unión a una CPA, las T-reg evitan la adhesión de otras células T

Las T-reg emiten una señal que evita que las APC envíen mensajes estimuladores a otras células T o inducen a que las CPA supriman a otras células, por ejemplo, mediante la liberación de moléculas mensajeras (citoquinas) con efectos inhibitorios.

células abundan en molécula intracelular Foxp3; concentración que supera la de cualquier otra característica molecular de las T-reg.

Propio de los factores de transcripción —categoría a la que pertenece la molécula Foxp3— es regular la actividad de determinados genes y controlar la síntesis de las proteínas por ellos codificadas. Habida cuenta de que las proteínas desempeñan diversas misiones celulares, la alteración de la síntesis de una o varias proteínas repercute en el funcionamiento de la célula. En el caso de Foxp3, los cambios que provoca sobre la actividad génica parecen convertir en T-reg las células T en desarrollo. De hecho, la introducción artificial de Foxp3 en células T anodinas provoca tal reprogramación, que las células adquieren la capacidad supresora de las T-reg genuinas producidas por el timo. En fecha reciente se ha descubierto que un tipo de ratón de la cepa Scurfy posee sólo una forma mutante, inactiva, de la proteína Foxp3, al tiempo que carece de T-reg. En razón de ello, el sistema inmunitario se descontrola y se generaliza la inflamación de numerosos órganos, que desemboca en la muerte precoz del animal.

Las T-reg se estudian en ratones para que el conocimiento adquirido pueda aplicarse a los seres humanos. Pero, ¿hay pruebas sobre el interés que las T-reg puedan revestir para el hombre o siquiera de su existencia en nuestro organismo?

Las características moleculares específicas de las T-reg en roedores son peculiares también de cierto subconjunto de células T humanas. En ambos casos (humanos y roedores), estas células exhiben la molécula CD25 y presentan un contenido elevado de Foxp3; además, muestran actividad inmunosupresora, al menos *in vitro*.

Quizá las pruebas más convincentes de la importancia de las T-reg para la salud humana procedan de una anomalía génica poco frecuente, la IPEX (síndrome de *i*nmunodisregulación, *p*oliendocrinopatía y *e*nteropatía ligado al cromosoma *X*). Originado por mutaciones en un gen del cromosoma X, el IPEX afecta a niños varones que, a diferencia de las niñas, heredan sólo un cromosoma X y, por tanto, carecen de la posibilidad de heredar una segunda copia normal del gen que codificaría una versión sana de la proteína afectada.

En los varones, la mutación da lugar a una enfermedad autoinmunitaria que afecta a varios órganos (incluidos el tiroides y, como ocurre en la diabetes dependiente de insulina, el páncreas); causa también una inflamación crónica del intestino (enfermedad inflamatoria intestinal) y alergia incontrolada (alergia alimentaria y dermatitis). Esos efectos constituyen manifestaciones de la hiperactividad de un sistema inmunitario que no está sometido al control de las T-reg. La muerte tiene lugar durante la infancia o poco después, con intervención de patologías diversas, desde diabetes autoinmunitaria hasta la diarrea grave. Se ha demostrado que la anomalía génica causante del IPEX corresponde a una mutación en *Foxp3*. El IPEX vendría a ser, por tanto, el homólogo humano de la enfermedad que presentan los ratones Scurfy.

Más allá de la autotolerancia

Las pruebas indican que, en humanos, las T-reg previenen las enfermedades autoinmunitarias. Pero esas células con-

AMADEO BACHAR

recibe otras señales de la CPA, las células T se tornarán activas contra el portador de ese antígeno; y ello, aun cuando el antígeno procede del propio organismo, en vez de pertenecer a un agente infeccioso. Los RCT de T-reg reconocen, asimismo, determinados antígenos; suprimen de forma específica a las células T dirigidas contra esos mismos antígenos.

T-REG APACIGUA A OTRAS CELULAS T DIRECTAMENTE

La T-reg utiliza a las CPA como una plataforma desde la cual estabilizar los contactos con otras células T unidas a las CPA. Luego, la T-reg envía una señal inhibidora a la célula T o libera moléculas inhibidoras que operan a corta distancia.

tribuyen al mantenimiento de la salud también mediante otros mecanismos; por citar uno, la participación en las respuestas ante microorganismos.

A lo largo de los años noventa, Fiona Powrie y su grupo del Instituto de Investigación DNAX en Palo Alto acometieron una tanda de experimentos en los que transferían poblaciones de células T privadas de T-reg a ratones transgénicos desprovistos de sistema inmunitario propio. La transferencia producía una variante grave, letal a menudo, de la enfermedad inflamatoria intestinal. Sin embargo, la actividad inmunitaria aberrante no se dirigía con especial intensidad sobre el propio tejido intestinal.

El intestino de los roedores, igual que el humano, alberga una vasta población bacteriana: más de un billón de bacterias por cada gramo de tejido intestinal. Aunque foráneas, las bacterias no suelen resultar dañinas, ni mucho menos; de hecho, favorecen la digestión de los alimentos e incluso desplazan a bacterias peligrosas (la salmonela, por ejemplo) que, de natural, tratarían de colonizar el intestino. En condiciones normales, el sistema inmunitario tolera la presencia de la población bacteriana útil. En los ratones de Powrie, en cambio, las atacaba. Y al hacerlo, las células inmunitarias trasplantadas provocaban daños colaterales en el intestino del receptor. Sin embargo, la transferencia de T-reg no causaba problemas. De hecho, si se transferían junto con el resto de células T, las T-reg evitaban la enfermedad intestinal que, de otra forma, hubiese sobrevenido. El sistema inmunitario parecía estar regulado por un mecanismo dotado de una sensibilidad exquisita, preparado para atacar a las bacterias intestinales y controlado sólo por las T-reg.

Un mecanismo de pareja sensibilidad podría condicionar las respuestas del sistema inmunitario ante invasores lesivos. Por un lado, las T-reg podrían responder con contundencia desmesurada. Por otro, el control podría evitar que el invasor fuera destruido del todo, permitiéndole persistir y brotar de nuevo. A este respecto se ha sabido que el fracaso en la erradicación de la bacteria *Helicobacter pylori* (causante de la úlcera de estómago) podría guardar relación con el bloqueo de la respuesta celular inmunitaria por parte de las T-reg.

El trabajo del equipo que dirige David Sacks, del estadounidense Instituto Nacional de la Salud, ha sacado a la luz una complejidad aún mayor. Dejar que sobrevivan unos cuantos organismos invasores no tiene por qué resultar arriesgado. Se infectaron ratones con un parásito moderado. Aun cuando el sistema inmunitario persistía en su integridad cabal, se permitía la permanencia de un número reducido de parásitos; tras ello, la reinfección desencadenaba una respuesta pronta y eficaz. En cambio, si se despojaba al sistema inmunitario de sus T-reg, el parásito se eliminaba por completo, pero la respuesta ante una reinfección resultaba ineficaz, como si los ratones jamás hubiesen estado en contacto con el invasor. De ello se infiere que las T-reg contribuyen al mantenimiento de la memoria inmunitaria, un proceso crucial para la inmunidad ante infecciones repetidas, que, además, constituye el principio que subyace a la vacunación.

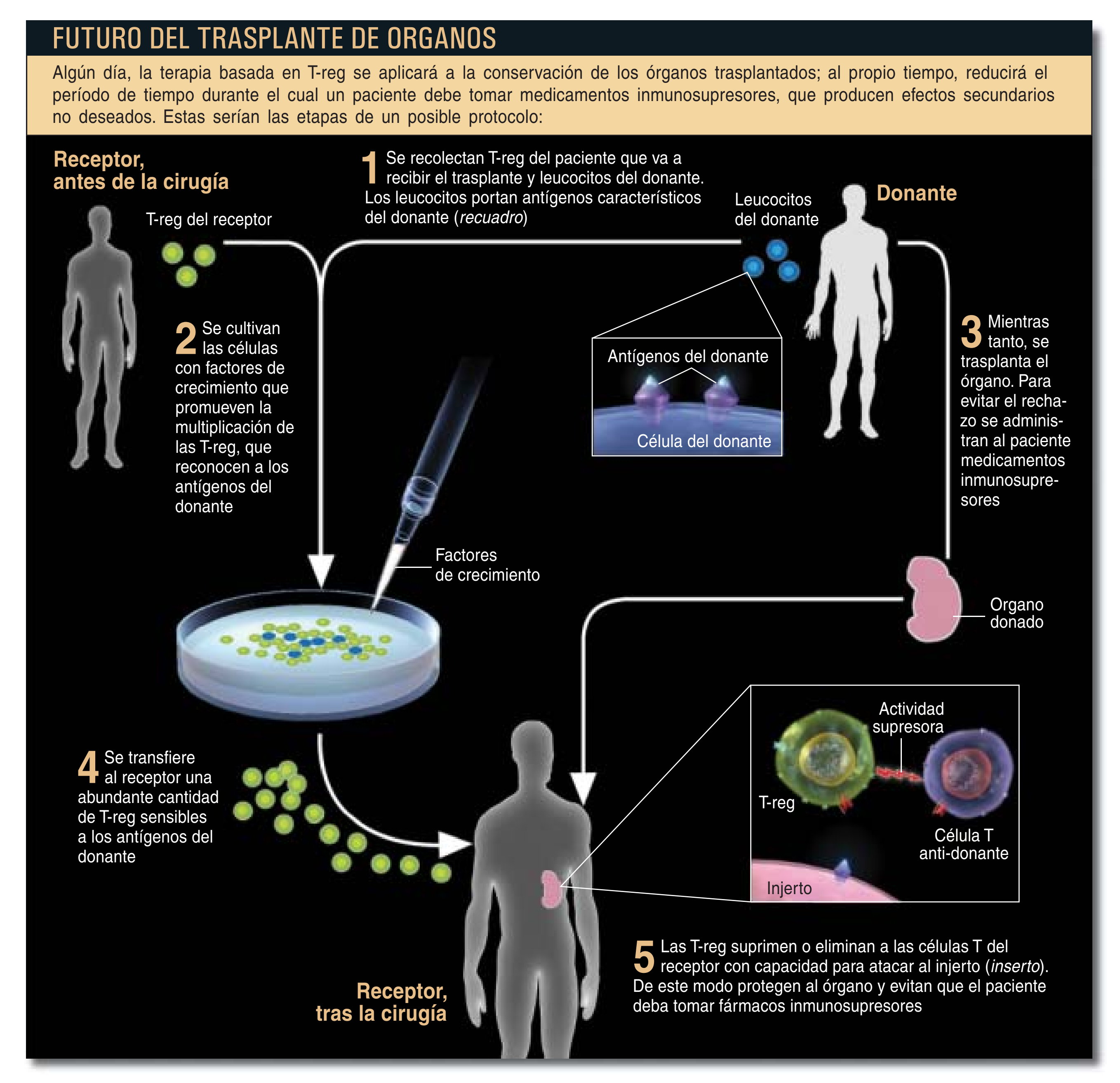
La investigación también aporta datos sobre la función de las T-reg en la protección de los embarazos. La preñez plantea un desafío a las defensas inmunitarias de la madre. Dado que la mitad de los genes los hereda del padre, el feto difiere la mitad de la madre, desde el punto de vista genético. En esencia viene a ser un "órgano trasplantado".

Hay en el interior del trofoblasto —tejido placentario que adhiere el feto a la pared del útero— varios mecanismos para dotar al feto de cierta seguridad ante lo que podría equipararse a un rechazo a un trasplante. El trofoblasto no constituye sólo una barrera física frente a posibles agresores agazapados en la sangre materna, sino que produce también moléculas inmunosupresoras.

El propio sistema inmunitario de la madre experimenta ciertos cambios. Los casos de mujeres en las que una enfermedad autoinmunitaria como la esclerosis múltiple entra en recesión durante el embarazo ofrecen una prueba indirecta del aumento de actividad de las T-reg. La investigación reciente proporciona un apoyo más sólido. En la Universidad de Cambridge, el grupo que dirige Alexander Beltz ha demostrado que, en ratones, durante el embarazo, las T-reg maternas aumentan en número. Por el contrario, la ausencia de T-reg (inducida mediante ingeniería genética) provoca el rechazo del feto con la infiltración masiva de células inmunitarias a través de la barrera materno-fetal. En algunas mujeres, cabe especular, una actividad insuficiente de las T-reg podría constituir la causa de abortos espontáneos recurrentes.

Reclutamiento de los reguladores

Está claro que con las T-reg, la naturaleza ha desarrollado un poderoso método para controlar las respuestas



inmunitarias. Si pudiéramos sumergirnos en ese mecanismo de control, convertiríamos a las T-reg en poderosos aliados terapéuticos ante una amplia gama de trastornos. La administración de las propias T-reg, o de fármacos que aumenten o disminuyan su actividad, abriría nuevas vías terapéuticas para diversas enfermedades. De hecho, ya se están llevando a cabo algunos ensayos clínicos en humanos.

La aplicación más obvia consistiría en una intensificación de la actividad de las T-reg para luchar contra las enfermedades autoinmunitarias. Se está investigando una terapia con fármacos en pacientes con esclerosis múltiple y psoriasis, además de otras enfermedades. El incremento de la actividad de las T-reg podría aplicarse también al tratamiento de alergias. La facilidad con que las T-reg mantienen a raya las respuestas inmunitarias, sugiere que el rechazo de órganos trasplantados se evitaría mediante terapias basadas en T-reg. Lo ideal sería que los receptores de trasplantes tolerasen los injertos igual que si se tratara de sus propios tejidos, o lograr una tolerancia que se mantuviese de forma permanente, sin necesidad de administrar fármacos inmunosupresores, que conllevan efectos secundarios.

Un enfoque terapéutico opuesto se fundaría en una eliminación selectiva de las T-reg para contrarrestar una inmunosupresión no deseada y, por consiguiente, reforzar las respuestas inmunitarias beneficiosas. En la práctica, se preferiría una eliminación parcial a una completa, pues el riesgo de inducir una enfermedad autoinmunitaria sería menor. La mejor opción se fundaría en la eliminación de sólo aquellas T-reg que bloquearan una respuesta inmunitaria útil, Tendríamos así una estrategia ideal para el tratamiento de las enfermedades infecciosas que el sistema inmunitario tiende a combatir de forma inadecuada (tuberculosis, sida, etcétera).

AMADEO BACHAR

Vías terapéuticas basadas en T-reg

Las terapias que se muestran en la tabla ya han entrado (o están a punto de entrar) en la fase de ensayos clínicos con humanos. En su mayoría, los medicamentos investigados tratan de reducir el número de células T-reg o de inhibirlas, de suerte que se potencie la respuesta inmunitaria antitumoral amortiguada en condiciones normales por tales células. Sin embargo, la introducción de los agentes en el organismo debería controlarse para asegurar que la actividad reducida de las T-reg no provoca autoinmunidad.

EFECTO SOBRE LAS T-REG	EJEMPLOS DE ENFERMEDADES QUE SE INTENTA CURAR	ESTRATEGIAS PARA EL TRATAMIENTO
Reducción del número o inhibición (para potenciar la inmunidad)	Cánceres de piel (melanoma), ovario y riñón	Una toxina unida a una sustancia (la interleuquina-2, por ejemplo) capaz de introducir la toxina en las T-reg Anticuerpos monoclonales (acoplados a moléculas específicas) que inducen la muerte de las T-reg o bloquean la migración de las células hacia los tumores
Multiplicación dentro del paciente (para amortiguar la autoinmunidad)	Esclerosis múltiple, psoriasis, enfermedad de Chron, diabetes dependiente de insulina	Vacunas constituidas por componentes de los receptores de células T que parecen estimular la proliferación de T-reg Un anticuerpo monoclonal que parece estimular las T-reg mediante la unión a la molécula CD3
Multiplicación en el laboratorio, para ser administradas al paciente	Reacción del injerto contra el huésped (las células inmunitarias de la médula ósea del donante atacan a los tejidos del receptor)	Se cultivan las T-reg del donante con anticuerpos seleccionados y con factores de crecimiento; luego, se administra la población de T-reg resultante antes o durante el trasplante de médula ósea (con fines preventivos) o en caso de observar reacción del injerto contra el huésped

Además, la reducción de T-reg resultaría beneficiosa para el tratamiento del cáncer. Según múltiples indicios, las células inmunitarias que circulan por la sangre están al acecho para detectar las aberraciones moleculares que se desarrollan en el tránsito de una célula normal a cancerosa. En la medida en que las T-reg dificultan esta vigilancia podrían, de forma involuntaria, ayudar a que un tumor maligno arraigue y crezca. De hecho, algunos cánceres parecen fomentar este tipo de ayuda: secretan señales moleculares que atraen a las T-reg y convierten células que no son T-reg en células T-reg. Algunas observaciones inducen a pensar que los pacientes de cáncer presentan una cifra inusualmente elevada de T-reg activas en la sangre así como en los tumores. En buena medida, la investigación actual sobre la manipulación terapéutica de las T-reg se centra en el cáncer.

Desafíos técnicos

El desarrollo de medicamentos que eliminen o amplíen la población de T-reg en el cuerpo del paciente constituye un reto. Para que su eficacia sea máxima, estos fármacos deberían operar sobre los subconjuntos de T-reg que intervienen en una enfermedad concreta. Pero no es frecuente que se sepa sobre qué tipos de T-reg actuar.

El diseño de estrategias basadas en la administración de las propias T-reg entraña dificultades. Uno de los principales obstáculos reside en la obtención de un número suficiente de células. Si bien las T-reg operan incluso en concentraciones limitadas (comparadas con las células que suprimen), el control de una enfermedad autoinmunitaria en humanos precisaría decenas de millones de T-reg. Extraer del torrente circulatorio del sujeto una cantidad semejante de células reguladoras resultaría imposible. Por consiguiente, se impondría la necesidad de desarrollar una técnica que aumentara su cuantía en el exterior del organismo.

Por fortuna, parece que podemos ganar esa guerra de cifras. Varios grupos de investigación han señalado que pueden generarse células con actividad inmunosupresora en cuantía notable mediante el tratamiento de células T normales con un "cóctel" de señales bioquímicas. Todavía no está claro si las células engendradas, las Tr1, son idénticas a las T-reg, pero queda fuera de toda duda que muestran una potente actividad inmunosupresora.

Ahora que se sabe que Foxp3 constituye una molécula básica para el control del desarrollo y la función de las T-reg, los expertos podrían obtener, a voluntad, células reguladoras mediante la transferencia del gen *Foxp3* a los tipos de células T más frecuentes. Varios grupos de investigación (entre ellos el de los autores) trabajan intensamente en esa dirección. Nos proponemos, además, identificar los procesos moleculares que activan la producción de Foxp3 durante el desarrollo de las T-reg. Este conocimiento abriría nuevas vías para el diseño de fármacos con ese fin específico, de modo que no fueran necesarios, ni el procesamiento de las células en el exterior del organismo ni su posterior inoculación.

En el caso de los pacientes con órganos trasplantados se está considerando otra forma de obtención de T-reg. El proceso implica la extracción de T-reg del futuro receptor del trasplante y su cultivo en presencia de células procedentes del donante, de modo que se privilegie la multiplicación de las T-reg con mayor capacidad para suprimir el rechazo. En roedores, las T-reg así generadas han funcionado bien. Uno de los autores (Sakaguchi) ha demostrado que basta la inyección de una dosis de este tipo de T-reg durante un injerto de piel para aceptar sin más el injerto. (Sabido es que la piel trasplantada suele provocar un fuerte rechazo.) El tratamiento deja intacto al resto del sistema inmunitario, listo para repeler la invasión de microorganismos.

Existen numerosos proyectos de investigación centrados en las T-reg. Algún día, esa estrategia terapéutica será una realidad. Protegería a los receptores de nuevos trasplantes, mientras llega el momento de poder fabricar fármacos que produzcan, de forma más sencilla, los mismos efectos beneficiosos.

Durante el último decenio, nuestra idea sobre el sistema inmunitario y su autocontrol ha experimentado un cambio profundo. Aunque el sistema permite la circulación de células T potencialmente autodestructivas, dispone de células T capaces de controlarlas. Saber de qué modo se desarrollan y cómo desempeñan su actividad inmunosupresora resultará crucial para incorporarlas en la lucha contra enfermedades debilitantes de muy diverso tipo, letales incluso. Al permitir la destrucción de lo foráneo y, al propio tiempo, evitar la destrucción de lo propio, las T-reg puede que constituyan los máximos guardianes de la paz del sistema inmunitario.

Los autores

Zoltan Fehervari es investigador del departamento de patología de la Universidad de Cambridge. **Shimon Sakaguchi** es catedrático y director del departamento de patología experimental en el Instituto de Medicina Avanzada de la Universidad de Kioto.

Bibliografía complementaria

NATURALLY ARISING CD4+ REGULATORY T CELLS FOR IMMUNOLOGIC SELF-TOLERANCE AND NEGATIVE CONTROL OF IMMUNE RESPONSES. Shimon Sakaguchi en *Annual Review of Immunology*, vol. 22, págs. 531-562; 2004.

REGULATORY T-CELL THERAPY: IS IT READY FOR THE CLINIC? J. A. Bluestone en *Nature Reviews Immunology*, vol. 5, n.º 4, págs. 343-349; abril, 2005.

REGULATORY T CELLS, TUMOUR IMMUNITY AND IMMUNOTHERAPY. Weiping Zou en *Nature Reviews Immunology*, vol. 6, n.º 4, páginas 295-307; abril, 2006.

T LYMPHOCYTES: REGULATORY. Zoltan Fehervari y Shimon Sakaguchi en *Encyclopedia of Life Sciences*. Wiley InterScience, 2006.

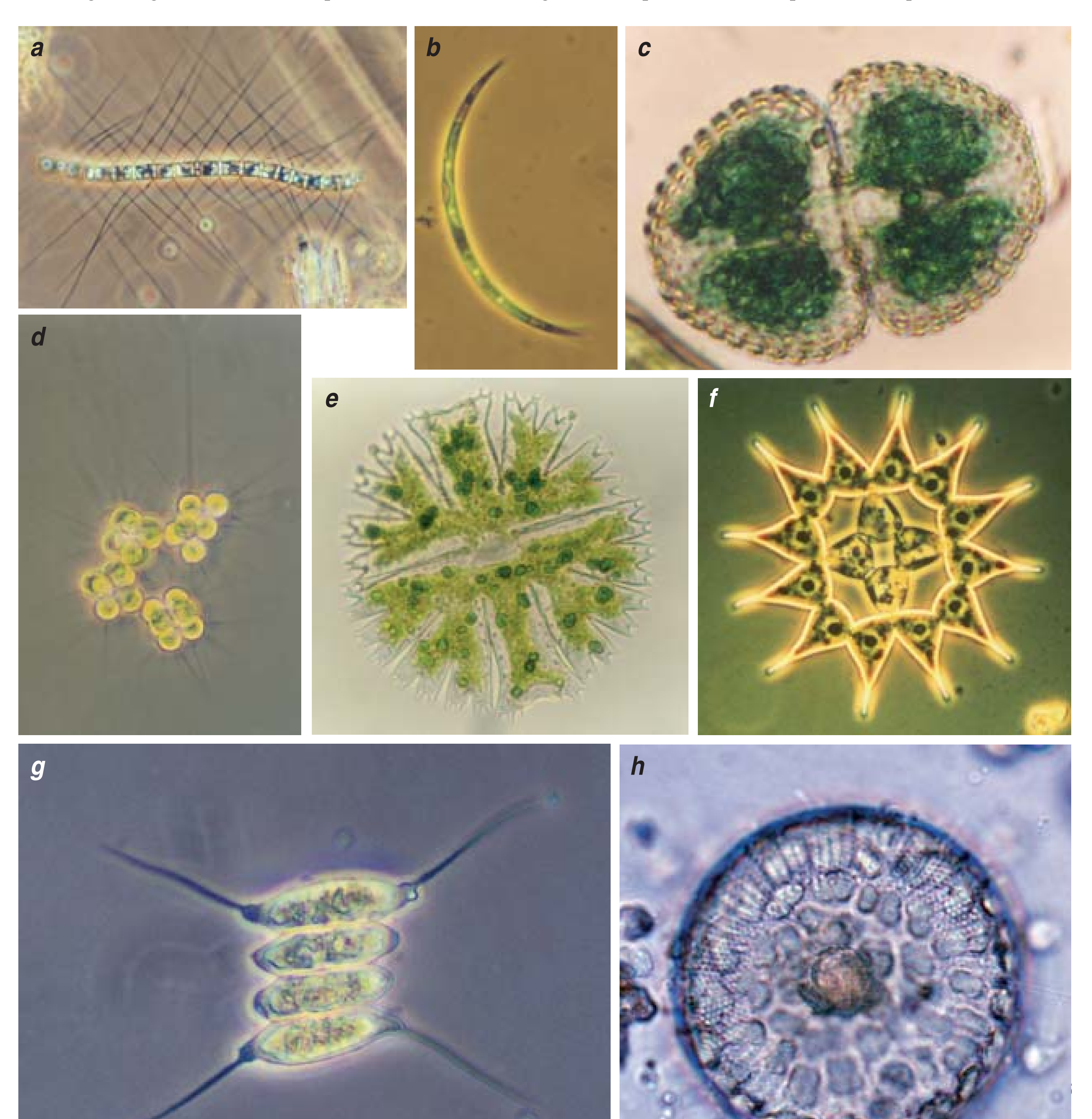
Microalgas

Cultivo y aplicaciones técnicas

Las algas, que suman dos terceras partes de la biomasa mundial, constituyen el mayor recurso natural terrestre. Son responsables de la mitad de la actividad fotosintética global y constituyen el inicio de la cadena trófica. Las especies de mayor importancia se encuentran entre las microalgas, organismos microscópicos fotosintéticos que presentan un área superficial elevada.

Las algas medran en ambientes acuáticos, superficies terrestres, troncos de árboles, bancos de nieve, aguas termales o en el interior de oquedades mínimas de rocas del desierto. Algunas viven en simbiosis con animales, hongos u otras plantas. Las algas liberan oxígeno durante las horas de sol. Ello las convierte en agentes impulsores de numerosos cambios químicos y procesos metabólicos acuáticos. El oxígeno queda disponible para la respiración de los animales. Mediante la estimulación de la actividad bacteriana aerobia, el oxígeno previene la aparición de condiciones sépticas.

En el grupo de las microalgas se incluyen las cianobacterias, organismos procariotas que llevan a cabo



CORTESIA DE Mª GUADALUPE OLIVA MARTINEZ, *Laboratorio de Botánica, Unidad de Morfofisiología;* FES-IZTACALA, UNAM

fotosíntesis oxigénica. En los últimos años, a medida que se ha ahondado en su fisiología, las cianobacterias han ampliado su potencial de aplicación: se utilizan como fuente de vitaminas y proteínas, biofertilizantes, biosensores, etcétera.

Las microalgas han prosperado merced a su singular dotación génica. Satisfacen sus requerimientos fisiológicos básicos para crecer y reproducirse en un ambiente concreto, al tiempo que interactúan con éxito con otros microorganismos de ese medio. Sobreviven en condiciones ambientales de particular dureza.

La idea de recurrir a la biomasa algal como posible substituto de las proteínas de origen animal para el consumo humano surgió en el seno de un trabajo financiado por la Institución Carnegie y realizado entre 1948 y 1952. Siguieron numerosas investigaciones de otros laboratorios. En los años setenta, mientras la posibilidad de utilizar la biomasa algal como fuente de proteínas para el consumo humano perdía fuerza (salvo en Japón y Taiwán), su uso como fuente proteica para el consumo animal ganó terreno, sobre todo cuando la producción de algas se planteó como parte de esquemas de tratamiento de aguas residuales.

El rastreo en las principales bases de datos sobre las investigaciones en microalgas a lo largo del último decenio, nos ha permitido descubrir el enorme interés que despiertan en diversos campos: biología (fisiología y metabolismo, taxonomía y evolución), genética, ecología, acuacultura, biotecnología, ciencias de los alimentos y biorremediación de aguas contaminadas.

Para el cultivo de microalgas es necesario contar con un inóculo que crezca de forma activa y establecer las condiciones de luz, temperatura y nutrientes adecuadas para su propagación. Las microalgas se cultivan en sistemas abiertos o cerrados. En los sistemas abiertos el cultivo se halla expuesto a la atmósfera; son los sistemas más antiguos; pueden ser naturales (lagos o lagunas) o artificiales (lagunas que ocupan grandes extensiones de tierra, pero de escasa profundidad, que se agitan por medios mecánicos).

Chaetoceros elmorei (*a*); *Closterium parvulum* (*b*); *Cosmarium speciosum* v. *myakense* (*c*); *Micractinium pusillum* (*d*); *Micrasterias radiosa* (*e*); *Pediastrum simplex* (*f*); *Scenedesmus protuberans* (*g*); *Stephanodiscus niagarae* (*h*).

En los sistemas cerrados, el cultivo tiene poco o ningún contacto con la atmósfera; se encuentra confinado en un fotobiorreactor que cuenta entre sus ventajas la de reducir la contaminación y lograr rendimientos elevados.

La investigación biotécnica se centra, sobre todo, en los géneros *Chlorella, Dunaliella, Haematococcus* y *Spirulina*. Desde el punto de vista industrial resulta de interés la producción de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga, carotenoides y pigmentos, entre otros. La utilización de microalgas y cianobacterias en procesos de biorremediación ofrece una alternativa atractiva debido a su capacidad de utilizar los nutrientes presentes en las aguas residuales. Las microalgas eliminan metales pesados y compuestos radiactivos a partir de efluentes; degradan compuestos aromáticos, plaguicidas y otros contaminantes persistentes.

Rosa Olivia Cañizares Villanueva
Hugo Virgilio Perales Vela
Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional CINVESTAV-IPN, San Pedro, Zacatenco, México, D.F.

Caenorhabditis elegans

Los mecanismos genéticos de la longevidad

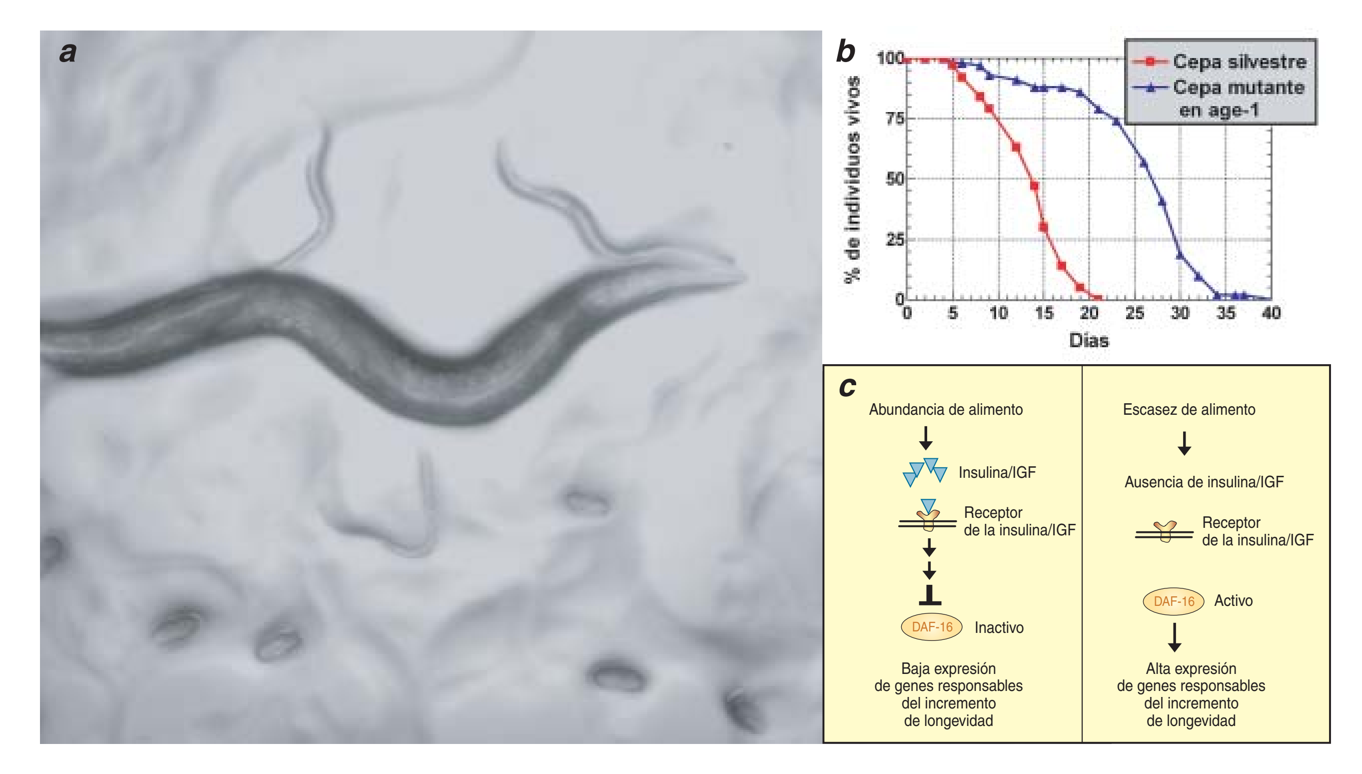
El envejecimiento es un proceso difícil de definir. Se ha descrito como la pérdida de vitalidad que ocurre con el tiempo, o como decía el matemático Benjamin Gompertz, el incremento exponencial con el tiempo de la probabilidad de morir.

La biología del desarrollo nos ha enseñado que, a partir de una célula, se forma un organismo complejo con multitud de tipos de células y tejidos, todo ello regulado muy finamente mediante complejos programas genéticos. El envejecimiento se puede entender como la segunda parte de ese programa de desarrollo. Una vez que hemos sido engendrados y cumplimos nuestra función reproductiva, morimos. ¿Hay algún programa genético, dirigido por genes asesinos, que nos marque, como si de una bomba de relojería se tratase, cuánto debemos vivir? En otras palabras, ¿hay genes cuya función sea la de hacernos viejos?

Se diría que el envejecimiento, al contrario de lo que ocurre con el desarrollo, constituyera un proceso pasivo que no necesitara la acción de ningún sistema bien ajustado y programado. El desgaste al que estamos sometidos durante la vida bastaría para hacernos envejecer, sin que se requiriera la actividad de ningún gen. Así es como los teóricos de la biología habían pensado durante mucho tiempo, hasta que tal enfoque entró en crisis a principios de los años ochenta, cuando Michael Klass aisló el mutante "*age-1*" en *Caenorhabditis elegans*, un nemátodo.

Al animal mutante le faltaba la actividad de un solo gen. Podía vivir un 50 % más que un gusano exento de la mutación. ¿Había un programa genético del envejecimiento? Años más tarde, la identificación de otros mutantes longevos empezó a encauzar la respuesta. La clave estaba en el ciclo de vida de *C. elegans*.

En condiciones adecuadas de cultivo, el nemátodo se desarrolla y llega a adulto fértil en tres días. Su fertilidad se extiende por otros tres días más, para empezar luego a envejecer hasta que muere de viejo en aproximadamente dos semanas. Pero esto no ocurre siempre así. Cuando un individuo detecta al nacer que el alimento va a ser escaso y que esto comprometerá su desarrollo y el de su progenie, entra en un estadio alternativo de desarrollo llamado *dauer* (en alemán significa duración), que le permite vivir durante varios meses. *Dauer* es un estadio de resistencia a múltiples tipos de estrés; es también un estadio de dispersión, ya que su misión es buscar una nueva fuente de alimento donde desarro-



Huevos, larvas y un individuo adulto del nemátodo *Caenorhabditis elegans* (*a*). Curva de longevidad de una población cuyos miembros no llevan ninguna mutación (cepa silvestre) y de una población de individuos mutantes para un gen de la ruta de la insulina/IGF (age-1) (*b*). El mutante duplica la longevidad de la cepa silvestre. Modelo de regulación de la longevidad mediante la ruta de la insulina (*c*). En presencia de alimento se produce secreción de insulina, lo que activa el receptor impidiendo la función de DAF-16. Con escasez de alimento no se produce secreción de insulina; por ello, DAF-16 puede activar los genes responsables del incremento de longevidad.

llarse para llegar a adulto y tener descendencia.

En *C. elegans* existen dos velocidades de envejecimiento. En buenas condiciones para el desarrollo y la reproducción, su vida media se cifra en dos semanas, mientras que en condiciones difíciles se prolonga varios meses. Este proceso sí puede estar bajo control genético, ya que es algo que la selección natural ha podido crear como un proceso ventajoso.

En condiciones nutricionales adecuadas lo más ventajoso y competitivo es dejar el mayor número de descendientes tan rápido como se pueda, pero en épocas de hambruna, lo mejor es poder sobrevivir a esas condiciones y, cuando mejoren, reproducirse. Un individuo que tenga un interruptor para elegir un tipo de envejecimiento u otro se hallará en ventaja selectiva frente a uno que no lo tenga y, por lo tanto, sus genes dispondrán de mayor probabilidad de transmitirse de generación en generación.

Cynthia Kenyon describió que tanto *age-1*, como otros mutantes longevos están parcialmente afectados por el programa de desarrollo *dauer*. Es decir, pese a su aspecto anatómico de adultos, portan activo el programa de longevidad del estadio *dauer*.

Para entender los mecanismos genéticos que controlan ese programa de longevidad, resultó determinante el aislamiento de más mutantes longevos. Gracias a ellos, se han podido identificar algunos genes y elementos implicados en la elección de un tipo u otro de programa (de vida corta o larga). Por ejemplo, corresponde a las neuronas sensoriales detectar si las condiciones del medio son o no adecuadas. Si, en virtud de una mutación, algunas de estas neuronas no pueden cumplir su misión, el gusano se mostrará incapaz de detectar el alimento, aunque se encuentre embadurnado en comida. Estos mutantes van a ser longevos porque “piensan” que están sometidos a una escasez de alimento.

El mecanismo de regulación de la longevidad mejor estudiado es la vía de señalización de la insulina, o de un factor de crecimiento similar a la insulina (IGF). En *C. elegans* la inactivación del gen homólogo al del receptor de la insulina humana, o de otros genes involucrados en la misma ruta, hace que el individuo viva el doble de lo que vive otro sin esas mutaciones. Al final de esta ruta de señalización se encuentra DAF-16, un factor de transcripción (proteína encargada de que otros genes se expresen) que deviene funcional justo cuando el receptor está desocupado.

En el modelo propuesto, la ruta de la insulina/IGF actuaría como interruptor que establecería qué programa de longevidad es adecuado en cada momento. En condiciones favorables para el crecimiento y la reproducción, las neuronas sensoriales permitirían la secreción de insulina mediante la activación del receptor e impidiendo que DAF-16 active otros genes. En condiciones hostiles para el ciclo reproductivo, las neuronas sensoriales detectarían esta circunstancia y dejarían de producir insulina, lo que permitiría la expresión de los genes diana de DAF-16.

Esos genes diana de DAF-16 serían en último término los responsables de un incremento de la longevidad. ¿Cuál es la función de estos genes? Se han identificado decenas de genes que se encuentran bajo la regulación de este factor de transcripción, con muy distintas funciones. Posiblemente los más interesantes sean los que permiten la resistencia a distintos tipos de daño o estrés. Pensemos en genes que son importantes en la supervivencia ante el estrés oxidativo o ante el estrés térmico. Y es que da la impresión de que el paso del tiempo genera en las células los mismos tipos de daños que los que producen estos tipos de estrés, de forma que los dotados de capacidad para resistir mejor la agresión serán más longevos. (Gracias a esta propiedad nuestro grupo ha aislado nuevos mutantes longevos.)

El mecanismo por el cual se produce un incremento de longevidad en momentos de crisis en la fuente de alimento no parece que sea exclusivo de los nemátodos. Desde hace bastante tiempo se sabe que los ratones sometidos a una dieta hipocalórica viven más que los ratones que no lo están. Y más recientemente, este proceso se ha descrito en la mosca del vinagre y en la levadura. Además, lo mismo que en *C. elegans*, hay mutaciones de los genes que participan en una ruta homóloga a la de la insulina/IGF que también producen un sustancial incremento de longevidad en la mosca del vinagre y en el ratón. En resumen, tales elementos y proceso de incremento de longevidad persistirían en organismos muy alejados desde el punto de vista evolutivo, hombre incluido.

MANUEL J. MUÑOZ RUIZ
MANUEL FIDALGO MERINO
Centro Andaluz de Biología del Desarrollo (CABD)
Universidad Pablo de Olavide
Sevilla

Transpiración en un pinar canario

La ecofisiología aplicada a la gestión forestal

La importancia de los bosques está ampliamente reconocida y su papel dentro del ciclo del agua es de vital importancia. En nuestros días, cuando las masas forestales desaparecen a un ritmo frenético por talas indiscriminadas, incendios o deforestación, el conocimiento del funcionamiento de los bosques es fundamental para su gestión, recuperación y protección.

Los bosques desempeñan también un papel decisivo en las islas Canarias. El archipiélago se encuentra en un enclave muy particular, con unas condiciones geográficas y climáticas que lo dotan de unas características propias que han hecho posible que se den dos masas forestales únicas en el mundo, la laurisilva y el pinar canario.

El pinar canario constituye la principal masa forestal de las islas, en la que domina el pino canario (*Pinus canariensis*), siendo ésta una especie endémica del archipiélago, donde quedó relegada tras la última glaciación, en el Cuaternario. El pinar canario se encuentra distribuido en las cumbres de las islas más occidentales, entre los 550 y los 2200 metros sobre el nivel del mar, variando esta franja en función de la orientación y pudiendo llegar incluso al nivel del mar en zonas donde existen afloramientos sálicos.

El pino canario tiene un papel crucial en el ciclo del agua en las islas y en la recarga de los acuíferos (principal fuente de agua en el archipiélago) ya que no hay cursos superficiales estables de agua dulce. En el norte de las islas, el pinar canario se encuentra muchas veces sometido a la influencia de los alisios. Estos vientos procedentes del norte llegan a Canarias cargados de humedad y forman el característico mar de nubes donde crece la laurisilva, pero donde en ocasiones también encontramos el pinar. Gracias a su anatomía, las acículas de los pinos captan la humedad ambiental en forma de pequeñas gotitas que se les quedan adheridas. De ese modo la cantidad de lluvia recogida bajo sus cubiertas puede llegar a ser hasta más del doble. La precipitación vertical (el agua de la lluvia) y la precipitación horizontal (el agua captada por las cubiertas vegetales) son los dos principales aportes de agua en este bosque.

Las plantas toman agua por las raíces y la transportan por el tronco y ramas, hasta que se pierde por las hojas en forma de vapor de agua (la transpiración), utilizándose sólo un 1 % para los procesos metabólicos. En la transpiración intervienen muchos factores y está condicionada principalmente por las condiciones climáticas. La cantidad de agua transpirada por los árboles aumenta con la temperatura y la radiación y



1. Pinar canario de repoblación bajo la influencia del mar de nubes.

se halla en relación inversa con la humedad del aire, siempre y cuando haya disponibilidad de agua en el suelo. Tanto la transpiración como la interceptación de agua de niebla por la cubierta pueden verse modificadas por varios factores, entre ellos la densidad del bosque.

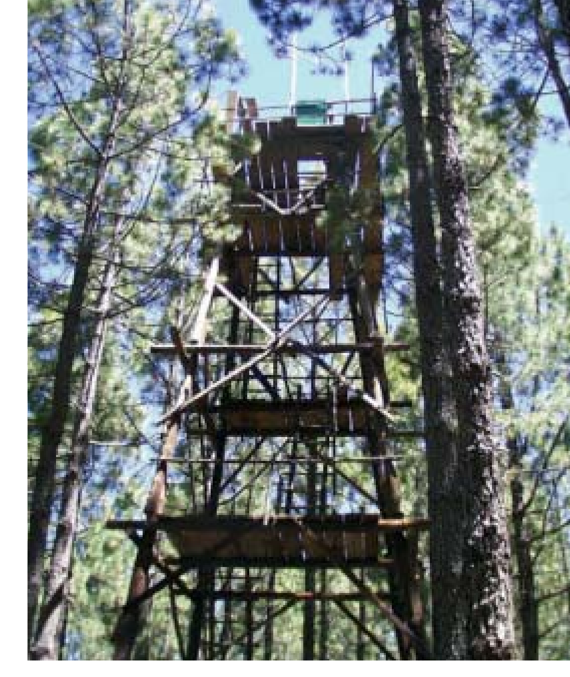
El grupo de ecofisiología vegetal de la Universidad de La Laguna se viene dedicando al estudio de este bosque desde hace más de 10 años. En una parcela experimental de pinar ha investigado la transpiración del bosque para así cuantificar las pérdidas de agua por transpiración.

En esta parcela de estudio se instaló una torre de 20 metros para el seguimiento de las condiciones climáticas por encima del dosel vegetal y doce sensores en seis árboles, representativos de las diferentes dimensiones de los ejemplares del bosque.

Las medidas de transpiración se realizaron con medidores de "flujo de savia", que registran la cantidad de agua que pasa por el tronco. Se instalan en los árboles obteniéndose un registro continuo de la cantidad de agua que se transporta por cada árbol. Se aplica la técnica del balance de calor, que consiste en insertar sensores de temperatura (termopares) en el tronco y electrodos que van suministrando calor en puntos determinados. Por medio de las diferencias de temperatura entre los sensores instalados en el tronco, y aplicando fórmulas que incluyen diversas variables, se conoce el flujo del agua por el interior del tronco en una determinada área; así se sabe qué cantidad se está transportando y cuánta se pierde por transpiración.

Estas medidas se extrapolaron para el conjunto del bosque. Se contó el número de árboles; se midió su área basal en una parcela representativa de la zona, de superficie conocida. La transpiración de la masa fue muy variable durante el año de medida, ya que se vio muy influida por las condiciones meteorológicas y la humedad de agua del suelo, que también fueron cambiantes.

Gracias a este estudio no sólo ha aumentado nuestro conocimiento ecofisiológico del funcionamiento del bosque. También, los datos de transpiración de las plantas y de la estación meteorológica, nos han permitido establecer un modelo, muy bien ajustado, que predice la transpiración del bosque en función de las condiciones climáticas de la zona. Tal modelización puede resultar de gran interés para una mejor gestión de los pinares canarios en el futuro. Con ellos cabría optimizar la densidad del bosque de modo que las ganancias hídricas superen a las pérdidas por transpiración contribuyendo así a la recarga de los acuíferos.



2. Torre experimental para las medidas climáticas.



3. Sensor de flujo de savia colocado en el tronco de un pino canario.

VANESSA C. LUIS DÍAZ
DOMINGO MORALES
M.ª SOLEDAD JIMÉNEZ
Depto. de Biología Vegetal,
Universidad de La Laguna, Tenerife

Gabriel Santpere y Begoña Vendrell

El calafate y el guanaco

1. Paisaje patagónico del Parque de Torres del Paine, en Chile. Conforme se avanza en altitud, la estepa se transforma en bosques de *Nothofagus* y luego en semidesiertos de altura. El calafate medra en las zonas más abiertas y expuestas de la estepa y los bosques.

Los antiguos pobladores indígenas del sur de la Patagonia lograron subsistir en un extenso terreno árido, azotado por un clima frío, lluvioso y de fuertes vientos. Los escasos recursos naturales siempre han sido aprovechados hasta el límite de sus posibilidades. Aconteció así con el calafate en el reino vegetal y con el guanaco en el reino animal. Ambas especies constituyen piezas clave para la subsistencia en tierras patagónicas.

El calafate es un arbusto espinoso de 1 a 3 metros de altura, que crece en terreno abierto al sur de la Patagonia. Existen tres especies de un solo género, *Berberis*: *B. buxifolia*, *B. darwinii* y *B. heterophilla*. Las tres poseen flores amarillas y frutos violáceos comestibles. Su consumo y aplicaciones se remontan al pasado ancestral de la Patagonia; han dado lugar a varias leyendas. "El que come calafate, siempre vuelve a la Patagonia", dicen los patagones al visitante. El arbusto sirve de materia prima para brebajes (licor, vino y jarabes), dulces y mermeladas. Tradicionalmente, además, se usa como remedio para la fiebre. Los indígenas (araucanos y tehuelches) aprovechaban el fruto y la corteza para la fabricación de tintes violáceos y amarillos, respectivamente.

El guanaco (*Lama guanicoe*) es un camélido de la Patagonia y Tierra del Fuego. Su gruesa piel lanuda lo protege del frío. Los adultos miden hasta 110 centímetros de cruz. Los guanacos tienen ojos grandes y largas pestañas y orejas. Son animales territoriales; delimitan sus dominios mediante cúmulos de heces. Viven en manadas de cerca de 20 individuos para protegerse de su depredador principal, el puma. Suelen reunirse en grupos de hembras y jóvenes controlados por un macho adulto. Cada hembra fértil contribuye al crecimiento del grupo con una cría por año.

Desde siempre, los nativos han usado el pelo del guanaco, la alpaca, para la confección de su propia indumentaria. Para los antiguos indígenas, el guanaco constituía una pieza fundamental de la subsistencia. De este camélido aprovechaban la carne, la piel, los tendones y los huesos, dando a todo ello innumerables usos: herramientas para coser, toldos para las tiendas, ornamentos y armas.



2. Arbusto espinoso de calafate. Sus hojas se agrupan en rosetas. Las espinas, amarillentas, miden entre 2 y 3 centímetros de longitud. Las flores (no aparecen en la imagen) son solitarias; salen de un pedúnculo que nace de cada roseta de hojas.

3. El fruto, llamado también calafate, es una baya comestible que contiene varias semillas.

4. Un guanaco en actitud de alerta, en la zona esteparia del Parque de Torres del Paine.

Jeffrey D. Sachs

Mientras arde el planeta, tocan la lira

¿Aceptarán los editorialistas del *Wall Street Journal* un desafío, gracias al cual se enterarían de la verdad sobre la ciencia del cambio climático global?

Un verano más se ha vuelto a batir el récord de temperaturas, con los consiguientes fallos energéticos, olas de calor, sequías y tormentas tropicales en EE.UU., Europa y Asia. Solamente un lugar parecía mantenerse fresco: las oficinas climatizadas del consejo editorial del *Wall Street Journal.* Mientras Nueva York languidecía, los editores, cómodos y despreocupados, propinaban a sus lectores editoriales asombrosamente desorientadores, continuando así su irresponsable cantinela de que la teoría del calentamiento global es fruto de una ciencia basura.

Ahora bien, no tengo nada en contra del *Wall Street Journal.* Es un periódico excelente que, tanto en sus columnas científicas como en la cobertura de noticias, ha tratado el tema del calentamiento global de forma cuidada y precisa. Sin embargo, la página editorial se mantiene atrincherada, al margen de los informadores y de la verdad.

El *Wall Street Journal* da vía libre a la irresponsabilidad en sus páginas editoriales.

Un editorial del 14 de julio, titulado "La cháchara del palo de hockey", sirve de perfecto ejemplo. El "palo de hockey" del cambio climático es una gráfica que publicaron por primera vez Michael Mann y sus colaboradores en 1998. Con ella intentaban reconstruir la temperatura media de la superficie del hemisferio norte desde el año 900 hasta el presente. La conclusión del análisis era que actualmente tenemos las temperaturas más altas del intervalo. Se sumaba así a las abrumadoras pruebas de que el cambio climático provocado por el ser humano ya está teniendo lugar.

La página editorial del *Wall Street Journal* se ha pronunciado contra estos descubrimientos científicos relativos al cambio climático a pesar de que existe un consenso científico mundial al ciento por ciento, incluidos los informes encargados por la escéptica Casa Blanca de Bush. De ahí que el palo de hockey se convirtiese en la bestia negra de la página editorial y del menguante número de "escépticos climáticos"; dirigentes de la derecha, como el diputado por Texas Joe Barton, presidente del subcomité parlamentario de Energía y Calidad del Aire, retomaron la ofensiva.

Como respuesta a estas presiones políticas crecientes, el Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias llevó a cabo una revisión científica y una actualización independiente y profunda de los datos y la investigación del palo de hockey. El Consejo se pronunció a favor del estudio de Mann: "El comité considera verosímil", se dice en su informe, "que el hemisferio norte haya estado más caliente durante las últimas décadas del siglo XX que durante cualquier período comparable del milenio precedente". Quedan dudas significativas sobre las temperaturas previas a 1600, apunta el Consejo Nacional, pero recalca que "la reconstrucción de las temperaturas de la superficie para los períodos previos a la era industrial es sólo uno de los múltiples tipos de indicio que llevan a admitir que el calentamiento global está ocurriendo como respuesta a la actividad humana y, de ellos, no es el fundamental".

La página editorial del *Wall Street Journal* ignoró completamente este informe, pero citó otro, encargado por Barton y elaborado por tres estadísticos sin ninguna credencial en ciencias medioambientales, donde se cuestionaban nimiedades de la metodología utilizada por Mann. Aun así, con estas endebles y engañosas pruebas, la página editorial declaraba que "no hay razón para creer que el señor Mann, ni su gráfica del 'palo de hockey' sobre los cambios de la temperatura global, estén en lo cierto", calificaba su investigación de "dudosa" y dictaminaba que la comunidad de expertos en clima "parece a menudo una sociedad que se dedica más a la admiración mutua que a una búsqueda competitiva y sin prejuicios del conocimiento científico".

El *Wall Street Journal* es el periódico de negocios más leído del mundo. Tiene una enorme influencia. Aun así, da vía libre a la irresponsabilidad de sus páginas editoriales. El Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia ha invitado repetidamente al equipo editorial a un encuentro con climatólogos destacados. Los redactores de noticias han aceptado con entusiasmo en muchas ocasiones, pero los editorialistas se han mantenido protegidos en su magnífico aislamiento.

Permítanme extenderles la invitación una vez más. Muchos de los expertos en el estudio del clima más destacados del mundo están dispuestos a reunirse con el consejo editorial del *Wall Street Journal* e invitar a esa reunión a todos los escépticos sobre el cambio climático que el consejo editorial quiera convocar. El consejo editorial nos debe a todos realizar su propia "búsqueda sin prejuicios del conocimiento científico".

Jeffrey Sachs es director del Instituto de la Tierra, de la Universidad de Columbia.



Andrew Lippman

La nueva era inalámbrica

Las emisiones espurias se convierten en fenómenos que abren el espectro radioeléctrico a nuevas aplicaciones de gran utilidad

Antes de 1968 no se podía conectar a la red telefónica de AT&T en EE.UU. aparatos que no hubiese suministrado su filial Western Electric. Una decisión de la Comisión Federal de Comunicaciones (la referida al sistema "Carterfone") marcó el fin de esa política y aportó un torrente de innovaciones en las comunicaciones: faxes, módems rápidos, centralitas privadas, alarmas antirrobo, contestadores y teléfonos móviles. Aunque AT&T ya no fuese el único dueño del pastel, la porción que conservó se convirtió en parte de un sector mucho más vasto.

La telefonía móvil empieza a conocer esa ampliación explosiva. La rapidez de los microprocesadores actuales les permite sintetizar y tratar directamente datos de sonido e imagen a la par que señales de radio. Y mientras tanto, la agilidad de nuevas redes con protocolos de comunicación ejecutados en terminales ofrece inusitadas oportunidades en las estructuras que durante cien años han soportado las comunicaciones. Sea cual fuere nuestra opinión sobre los equipos inalámbricos de hoy, no son en absoluto comparables con lo que nos depara el porvenir. La radio se pone interesante.

El espectro no tiene por qué ser un recurso limitado.

Los teléfonos móviles pasarán a ser programas que se cargarán en cualquier "máquina" física que convenga, quizás en muchas a la vez. En lugar de establecer un plan de servicio telefónico "familiar", algún día se podrá tener una cuenta "molecular" que dé acceso radioeléctrico a cualquier objeto o dato radioaccesible. Así podremos ver en directo el mundo exterior con los ojos de un perro, vigilar a distancia el nivel de glucosa en sangre o hablar con alguien por medio de las gafas de sol. La banda ancha pasará a ser dominio de una persona y no un hilo conectado a la vivienda.

El espectro radioeléctrico asignado a la radiodifusión, limitado, castigado por las interferencias, quedará abierto a todos y será accesible desde cualquier lugar. Por supuesto, algunas emisoras y redes registradas seguirán dependiendo de que ciertas bandas de frecuencias se mantengan desocupadas y mudas para que las utilicen aparatos heredados que nos resistiremos a desechar, un teléfono móvil o un receptor de AM. Pero más amplias perspectivas se abren a los dispositivos de radio que exploren de modo cooperativo el entorno de cada una, se utilicen mutuamente para economizar la energía radiada y la vida de las baterías, y conviertan regiones del espectro cada vez más remotas en territorio fértil para el uso personal.

Diversas experiencias describen este nuevo panorama de las comunicaciones inalámbricas. Por ejemplo, la propagación multitrayecto, en la que el receptor recibe múltiples copias de una sola señal reflejada en casas y paredes, creaba ecos en las imágenes de televisión. Pero estos reflectores pueden también considerarse transmisores independientes, puesto que envían energía adicional que de otro modo se perdería. Las comunicaciones pueden mejorarse mediante equipos de radio de entrada múltiple y salida múltiple diseñados para aprovechar este fenómeno.

Otros trabajos han establecido redes especializadas de radio móvil que van seleccionando, en cada momento, los retransmisores intermedios que requieran conexiones de mínimo consumo energético. En un instante dado, una estación de radio podría hallarse en un lugar inutilizable y otra en un punto apto para transferir una comunicación. Cuando los equipos de radio lleguen a costar menos que sus baterías, para reforzar la fiabilidad será más eficaz añadir transmisores que aumentar la potencia. Más importante aún es que desaparezca la dicotomía entre conexiones punto a punto y de radiodifusión; gracias a su diseño, unas y otras trabajarán conjuntamente.

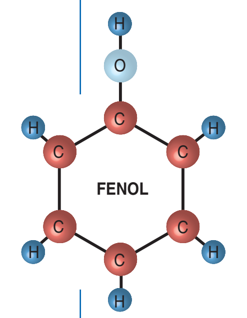
Una nueva disciplina, la codificación de red, utiliza la radiodifusión para ahorrar ancho de banda, con una codificación apropiada y luego transmitiendo bits a más de un receptor. La decodificación requiere la combinación de varias transmisiones, incluida la propia. Aplicando este principio hemos construido un sistema telefónico piloto en el que, por defecto, todos pueden oír a todos: es decir, una línea inalámbrica compartida. Lo denominamos "pulse para escuchar", porque el usuario decide a qué volumen y en qué oído desea oír a cualquiera de los demás; podría ser especialmente útil para agentes de bolsa, servicios de urgencias y participantes en audioteleconferencias.

El carácter radiodifusor de la transmisión inalámbrica constituye, pues, una ventaja y no una fuente de perturbaciones: economiza energía, aumenta la eficacia y nutre nuevas ideas. Y el espectro no tiene por qué ser un recurso fijo y limitado que haya de repartirse entre los usuarios. Antes bien, cuantos más lo utilicen, mayor volumen de comunicación dará cabida. Formulada hace sólo unos años, esta teoría se está haciendo ahora realidad.

Andrew Lippman dirige el programa de Comunicaciones Víricas de Media Lab y codirige el programa de Comunicaciones del Futuro en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Hervé This

Los taninos "se desvanecen"



Las innovaciones técnicas hacen que el conocimiento avance a saltos. Se requirió un navío de técnica depurada para descubrir América, un cohete para explorar la Luna, la espectrometría para analizar las moléculas de mezclas complejas... Sin embargo, a pesar de los nuevos hallazgos, los mecanismos del envejecimiento del vino permanecían envueltos en la obscuridad debido a la complejidad de las moléculas que le confieren color y sabor. Desde hace algunos años, el grupo liderado por Michel Moutounet y Véronique Cheynier en Montpellier, utilizan una técnica espectrométrica avanzada para el análisis de los fenómenos ligados al envejecimiento y maduración del vino.

Les interesan los polifenoles, moléculas que desempeñan una función fundamental en el sabor y el color del té, el café, el aceite de oliva, las rosas y los cosméticos, así como en la protección de las plantas contra los insectos. Numerosas substancias vegetales contienen esos compuestos, que poseen al menos un grupo fenol; éste cuenta con seis átomos de carbono, unidos cada uno a un átomo de hidrógeno, excepto uno que está enlazado a un grupo hidroxilo (un átomo de oxígeno unido a uno de hidrógeno).

Los taninos vienen utilizándose desde hace largo tiempo en el curtido de pieles, por su capacidad de unión a las proteínas de la piel. Pertenecen a dos familias de polifenoles: la de los taninos hidrolizables (en los que un azúcar está unido a polifenoles de tamaño escaso) y la de los taninos condensados (moléculas de gran tamaño formadas por asociación de varias unidades de flavanol, un polifenol). Estos taninos condensados se llaman también proantocianidinas, porque, si se calientan en medio ácido, liberan antocianos (pigmentos rojos o azules). Los polifenoles confieren a los vinos color y un sabor amargo. Los taninos son astringentes: cuando se unen a las proteínas lubrificantes de la saliva dejan la boca seca.

Reacciones de los taninos

¿Por qué los vinos tintos toman una tonalidad color teja cuando envejecen? ¿Por qué los vinos tánicos pierden su sabor amargo y su astringencia? Se creía que los polifenoles se asociaban mediante la formación de moléculas de tamaño cada vez mayor, que perdían astringencia y amargor. La investigación ha arrojado luz sobre la estructura de los taninos de la uva y sobre algunas transformaciones químicas que sufren los polifenoles en el vino.

Los químicos de Montpellier identificaron la estructura de los taninos condensados. El vino contiene numerosos polifenoles extraídos de la uva que no pertenecen a la familia de los taninos. Además, están los taninos hidrolizables, que provienen de la madera de roble o de los taninos enológicos añadidos. Finalmente, hay taninos condensados que se extraen de la piel de los granos de la uva; unos pocos proceden de las pepitas.

Las transformaciones químicas que sufren los polifenoles son las responsables de los cambios en el color y el carácter astringente del vino tinto. En la vinificación tienen lugar dos tipos principales de reacciones: las oxidaciones enzimáticas y las reacciones en que intervienen los antocianos y los flavanoles (subunidades de los taninos condensados). Las primeras transcurren sobre todo en los momentos iniciales; generan productos de color oscuro. Las segundas se siguen produciendo incluso cuando la actividad enzimática ha disminuido.

Estas transformaciones revisten importancia para la coloración. Los antocianos del vino (un medio ácido) se encuentran en dos formas en equilibrio: una de color rojo, dotada de carga positiva, y otra incolora, que está hidratada, es decir, unida a moléculas de agua. Predomina la segunda.

Para explicar la conversión de los taninos en pigmentos más estables que confieren tonalidad de color teja a los vinos añejos se habían propuesto numerosas reacciones en las que intervenían esas dos formas. Conocemos ya las reacciones que subyacen al envejecimiento del vino tinto. Las subunidades de los taninos condensados reaccionan directamente con los antocianos. Además, los dos tipos de molécula reaccionan merced al acetaldehído, molécula que producen las levaduras y la oxidación del etanol. Por fin, los antocianos se transforman en pigmentos más estables al reaccionar con metabolitos de las levaduras.

Todas estas reacciones aumentan el tamaño de las moléculas, pero los productos formados son a menudo inestables en el vino, un medio ácido. Las roturas espontáneas y las reacciones entre las moléculas así generadas con los compuestos fenólicos de menor tamaño hacen que se reduzca la longitud media de cadena de los derivados tánicos. Así pues, en el vino, las reacciones que sufren los taninos conducen en primer lugar a compuestos de mayor peso molecular, que se escinden después en compuestos más ligeros. La prevalencia de cada tipo depende de la composición inicial de polifenoles y también de otras condiciones: la concentración de oxígeno, la concentración de metabolitos en las levaduras (por ejemplo, el acetaldehído), el *p*H, etcétera.

En resumen, el análisis de los compuestos fenólicos del vino tinto muestra que el envejecimiento de éste guarda relación con una reducción de polifenoles más que un aumento de taninos. Esta reducción conlleva la pérdida de astringencia y la desaparición del sabor amargo.





1. BACTERIAS DEL AZUFRE verdes y purpúreas colonizan una fuente termal. Medran en agua anóxica y rica en sulfuro de hidrógeno. La presencia de extensos tapices oceánicos de estos organismos durante períodos antiguos de extinciones en masa sugiere que hubo condiciones similares predominantes en tales épocas.

IMPACTO desde las PROFUNDIDADES

Calor y gases sofocantes que emanaban de la tierra y el mar, y no asteroides, habrían causado varias extinciones en masa. ¿Podrían darse de nuevo las mismas condiciones de invernadero devastadoras?

Peter D. Ward

Thomas S. Kuhn, filósofo e historiador de la ciencia, sugirió que las disciplinas científicas remedaban en su desarrollo a los seres vivos. No crecían de forma lenta y continua, sino que disfrutaban de períodos prolongados de estabilidad interrumpidos por revoluciones ocasionales con la aparición de una nueva especie, una nueva teoría en el caso de la ciencia. Tal enfoque se ajusta como un guante al estudio de las causas y las consecuencias de las extinciones en masa, cataclismos biológicos periódicos en los que una gran proporción de los organismos del planeta se extinguió. Tras esos eventos, todo cambió.

Desde que descubrieron extinciones en masa históricas hace más de dos siglos, los paleontólogos creyeron que se trataba de acontecimientos graduales, causados por una combinación de cambio climático y fuerzas biológicas (depredación, competencia y enfermedades). Pero en 1980, la interpretación de las extinciones en masa sufrió un vuelco, una revolución "kuhniana". El equipo de Walter Alvarez, de la Universidad de California en Berkeley, propuso que la extinción que eliminó a los dinosaurios hace 65 millones de años ocurrió de forma súbita, en la catástrofe ecosistémica que siguió al impacto de un asteroide. En el transcurso de los dos decenios siguientes, la hipótesis de que un bólido procedente del espacio aniquiló un segmento notable de la vida sobre la Tierra fue aceptada sin reserva. En esa línea, numerosos expertos acabaron por creer que los escombros cósmicos causaron al menos otras tres de las cinco grandes extinciones en masa.

Ahora se está gestando otra transformación en nuestra concepción del pasado interrumpido de la vida terrestre. Aparecen nuevas pruebas geoquímicas procedentes de las bandas de roca estratificada que delinean los eventos de extinciones en masa en el registro geológico. Se han descubierto residuos químicos, denominados bioindicadores orgánicos, que produjeron seres vivos minúsculos que no suelen fosilizar. Según estos datos, los impactos cataclísmicos fueron la excepción, y no la norma, entre las causas de las extinciones en masa. Parece que, en la mayoría de los casos, la propia Tierra se habría convertido en el peor enemigo de la vida, de una manera que no habíamos imaginado. Las actividades humanas actuales quizás estén poniendo en peligro, una vez más, a la biosfera.

Después de Alvarez

Para comprender el entusiasmo general que despertó la teoría del impacto del asteroide, nos ayudará revisar las pruebas que la apoyaron. El escenario que planteaba Alvarez, junto con el físico Luis W. Alvarez (su padre) y los químicos nucleares Helen V. Michel y Frank Asaro, se fundaba sobre dos hipótesis. Primera, que un asteroide de unos 10 kilómetros de diámetro cayó sobre la Tierra hace 65 millones de años. Segunda, que las consecuencias ambientales del impacto eliminaron a más de la mitad de las especies. Habían encontrado las huellas que dejó la explosión en una gruesa capa de iridio (elemento raro en la Tierra, aunque común en cuerpos extraterrestres) que llovió polvoriento sobre el globo.

No habían pasado diez años desde un anuncio tan prodigioso, cuando apareció el rastro probatorio: el cráter de Chicxulub, en la península mexicana de Yucatán. Oculto a la vista, su descubrimiento despejó la mayoría de las dudas que pendían sobre la desaparición del reino de los

NATIONAL PARK SERVICE

dinosaurios con un impacto descomunal. Al propio tiempo, planteaba nuevas cuestiones sobre otros episodios de extinción en masa. Si uno fue causado por un impacto, ¿qué ocurrió con el resto? A lo largo de los últimos 500 millones de años, y por cinco veces, la mayoría de los organismos del planeta desaparecieron de pronto.

El primero de esos episodios ocurrió al final del período Ordovícico, hace unos 443 millones de años. El segundo, hace 374 millones de años, se produjo en las postrimerías del Devónico. El mayor de todos, la Gran Mortandad, al final del Pérmico (hace 251 millones de años), eliminó el 90 por ciento de los habitantes del océano y el 70 por ciento de las plantas y animales (insectos incluidos) de tierra firme [*véase* "La mayor extinción biológica conocida", de Douglas H. Erwin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre, 1996]. Se asistió a otra mortandad global hace 201 millones de años, cuando expiraba el período Triásico. La última extinción de importancia, hace 65 millones de años, cerró el Cretácico con el impacto mencionado del meteorito.

En los inicios de los noventa, David Raup predecía en *Extinciones: ¿genes perversos o mala suerte?* que terminaría por descubrirse que los impactos fueron los causantes de todas las extinciones en masa citadas, amén de otros eventos de menor gravedad. Las pruebas del impacto para la frontera geológica entre los períodos Cretácico y Terciario (K/T) eran y siguen resultando convincentes. Además del cráter de Chicxulub y del estrato inequívoco de iridio, los escombros del impacto, incluidas piedras sometidas a una enorme presión y distribuidas por todo el globo, dan fe de la colisión. Otras pistas químicas, inscritas en sedimentos antiguos, nos hablan de cambios súbitos en la composición atmosférica del planeta y en el clima subsiguiente.

En varios otros períodos de extinción, las señales apuntaban también en idéntica dirección. A comienzos de los setenta, los geólogos habían ya asociado una fina capa de iridio con las extinciones de las postrimerías del Devónico. En 2002, ciertos descubrimientos, desde sectores independientes, sugerían impactos de asteroides a últimos del Triásico y a últimos también del Pérmico. En el estrato del Triásico se registraban débiles trazas de iridio. En el caso del Pérmico, se aportó una pista sugestiva: moléculas de fullerenos, que se suponía contenían atrapados gases extraterrestres [*véase* "Impactos repetidos", de Luann Becker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo, 2002].

De ese modo, fue adquiriendo cuerpo la sospecha de que asteroides o cometas se hallaban en el origen de cuatro de las cinco grandes extinciones en masa. Se apartaba de ese guión el evento al final del Ordovícico, que se atribuyó a la radiación procedente de una estrella que explotó en nuestra vecindad cósmica.

Sin embargo, al ahondar, en años recientes, en el análisis de los datos, se descubrió que había muchos cabos sueltos. Del reexamen de los fósiles se desprendía que las extinciones del Pérmico y del Triásico correspondieron a procesos que se prolongaron cientos de miles de años. Las pruebas recientes sobre el aumento y caída del carbono atmosférico, que son propios de su ciclo, sugerían que la biosfera padeció, no un golpe catastrófico súbito, sino una extensa serie de perturbaciones ambientales.

Un impacto no tan súbito

Del evento K/T se desprendía que el impacto de un cuerpo de gran tamaño equivale a la acción de un terremoto que arrasa una ciudad. El desastre es súbito, devastador y de corta duración; terminada la sacudida, se emprende de inmediato la reconstrucción de la ciudad. Este ciclo de destrucción y recuperación subsiguiente queda reflejado en los datos de isótopos del carbono para las extinciones del K/T, así como en el registro fósil (aunque la verificación de esta última prueba requirió cierto tiempo). La esperada mortalidad súbita en la misma frontera K/T resulta evidente entre los fósiles más pequeños y más numerosos, los del plancton calcáreo y silícico, y en las esporas de las plantas. Pero conforme aumentaba el tamaño de los fósiles de un grupo, más gradual parecía su extinción.

Poco a poco, los paleontólogos comprendieron que ese patrón manifiesto venía condicionado por la escasez de fósiles de cierta entidad, de tamaño importante, en la mayoría de los horizontes sedimentarios y rocosos donde se había concentrado la investigación. Para salir al paso de ese problema de muestreo y obtener una imagen más clara del ritmo de las extinciones, Charles Marshall, de la Universidad de Harvard, desarrolló un protocolo para el análisis estadístico de distribuciones de fósiles. Mediante la determinación de la probabilidad de que una especie se haya extinguido dentro de un período de tiempo dado, el método analítico en cuestión desmenuza la máxima cantidad de información que proporcionan incluso los fósiles raros.

En 1996, Marshall y el autor aunaron fuerzas para aplicar ese protocolo en las secciones estratigráficas del K/T. Mostraron que lo que se manifestaba como una extinción gradual de los animales marinos de cierta talla más abundantes, los ammonites de Europa, resultaba coherente con su desaparición repentina en la frontera K/T. (Los ammonites son moluscos fósiles emparentados con el nautilo.)

Pero la aplicación de la nueva metodología a extinciones anteriores arrojó resultados distintos. El grupo del autor estudió estratos que representaban ambientes a la vez marinos y no marinos del final de los períodos Pér-

Resumen/Extinciones en masa

- Más de la mitad de los seres que han vivido en la Tierra han sido eliminados en el curso de sucesivas extinciones en masa, durante los últimos 500 millones de años.
- Uno de tales desastres, que conllevó la desaparición de los dinosaurios, se atribuye al impacto de un asteroide. Carecemos de pruebas contundentes sobre la identidad de los agentes causales de los demás episodios.
- Pero empiezan a barajarse nuevas pruebas fósiles y geoquímicas que sugieren un mecanismo ambiental sorprendente para las extinciones principales y, quizá, para el resto: un océano anóxico que expulsa gas venenoso como resultado del caldeamiento global.

mico y Triásico. Y se observó una sucesión más gradual de extinciones, agrupadas alrededor de las fronteras.

Este patrón se repetía en el registro de los isótopos de carbono, otra herramienta poderosa para interpretar la velocidad de extinción. Los átomos de carbono se encuentran en forma de isótopos, cada uno con un número distinto de neutrones (partículas carentes de carga eléctrica) en el núcleo. A muchos lectores les resultará familiar uno de estos isótopos, el carbono 14 (^{14}C), porque a menudo se utiliza su desintegración para la datación de esqueletos fósiles o muestras de sedimentos antiguos. Para la interpretación de las extinciones en masa, resulta de mayor utilidad la información que se extrae de la proporción entre los isótopos ^{12}C y ^{13}C del registro fósil, pues ofrece una instantánea más amplia de la vitalidad de la vida vegetal en aquella época.

Ello se debe a que la fotosíntesis altera la proporción $^{12}C/^{13}C$. Las plantas utilizan la energía solar para disociar el dióxido de carbono (CO_2) en carbono orgánico, que se aprovecha para la construcción de células y el suministro energético. Por suerte para los animales, y por ende para nosotros, el oxígeno libre es su producto de desecho. Pero se diría que las plantas son selectivas: prefieren CO_2 que contenga ^{12}C. Así, cuando abunda la vida vegetal (ya sea en forma de microorganismos fotosintetizadores, algas flotantes o árboles), en la atmósfera hay una proporción mayor de CO_2 que contiene ^{13}C (el ^{12}C atmosférico disminuye).

A partir del examen de las proporciones isotópicas en muestras de un tiempo anterior, contemporáneo y posterior a una extinción en masa, se obtiene un indicador fiable de la cantidad de vida vegetal terrestre y marina. Cuando se dibujan gráficamente tales medidas para el episodio del tránsito del Cretácico al Terciario, aparece un patrón sencillo. En simultaneidad a la localización de la capa de impacto que contiene las pruebas mineralógicas de los escombros, se observa que los isótopos del carbono cambian durante un tiempo corto, es decir, la concentración de ^{13}C cae en picado. Ese fenómeno nos indica que se produjo una mortandad súbita de la vida vegetal y una pronta recuperación. Tal hallazgo resulta coherente con el registro fósil de las grandes plantas terrestres así como del plancton marino microscópico; uno y otro dominio de la vida experimentaron pérdidas asombrosas en el evento K/T, pero no tardaron en recuperarse.

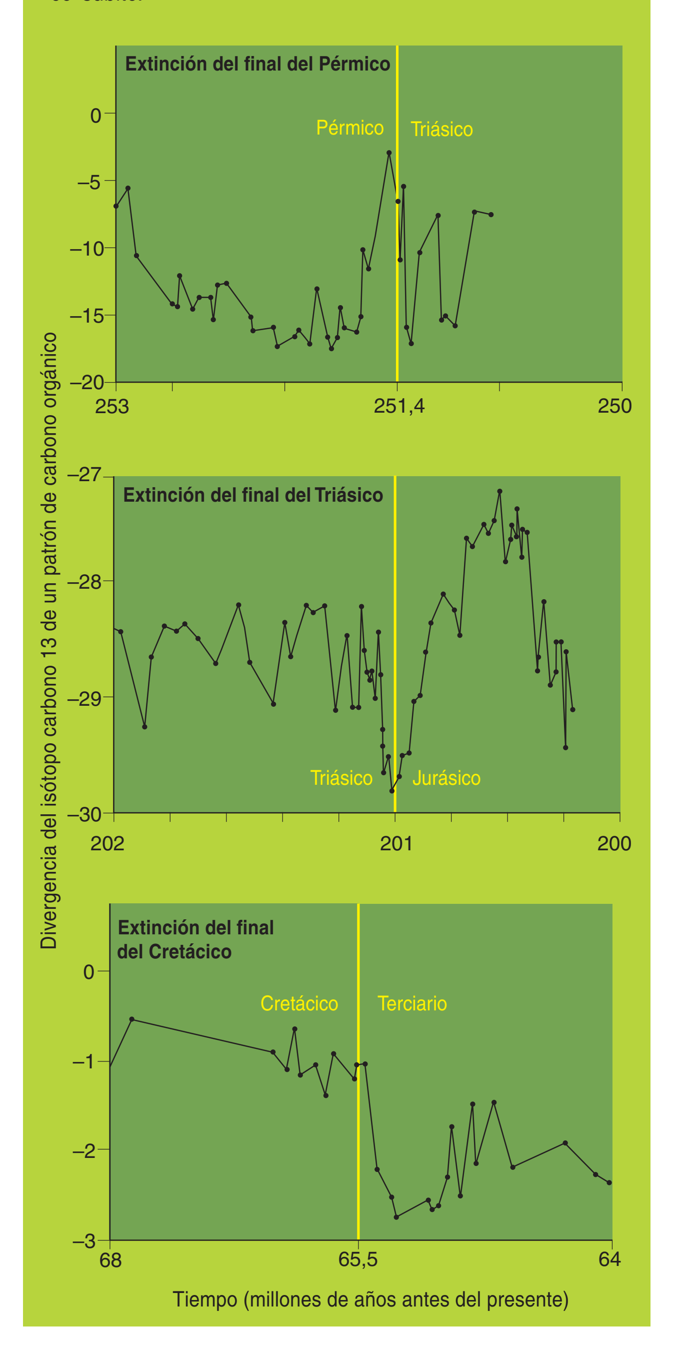
Los registros de carbono correspondientes al Pérmico y el Triásico hablan de un destino muy distinto para las plantas y el plancton durante esas dos extinciones en masa. En ambos casos, se desarrollaron múltiples cambios isotópicos a lo largo de intervalos temporales de 50.000 a 100.000 años, indicio de que las comunidades vegetales fueron eliminadas, y después volvieron a constituirse, sólo para ser perturbadas de nuevo por una serie de episodios de extinción.

Para crear ese patrón, se necesitaría una serie de impactos de asteroides, separados por miles de años. Pero no existe ninguna prueba mineralógica para una secuencia de impactos que abarque un período de tiempo similar.

De hecho, la investigación ulterior de los datos ha cuestionado la probabilidad de que en aquella época se produjera *ningún* impacto. Nadie ha logrado repe-

Patrones de destrucción

El isótopo 13 del carbono (^{13}C) que se encuentra en los estratos geológicos sugiere que, en dos de cada tres episodios de extinción, intervinieron mecanismos de larga duración. El ^{13}C se torna más abundante en la atmósfera cuando medran las plantas, terrestres y marinas. Si desaparece la vida vegetal, cae la proporción de ^{13}C en el carbono atmosférico. Al comparar muestras antiguas con un patrón de carbono común salen a la luz caídas importantes y múltiples en el ^{13}C, que llevan a las fronteras del final del Pérmico *(arriba)* y del Triásico *(centro)*. Las caídas implican crisis de extinción múltiples que tuvieron lugar en el transcurso de cientos de miles de años. El desplome de ^{13}C durante el límite entre el Cretácico y el Terciario (*abajo*) ilustra, por contra, un cataclismo ecológico súbito.



JANET CHAO

tir el hallazgo original de fullerenos portadores de gas extraterrestre y correspondientes a las postrimerías del Pérmico.

Ha quedado también descartado un supuesto descubrimiento de cuarzo fragmentado de aquel período. Y los geólogos no se ponen de acuerdo sobre los supuestos cráteres de impacto correspondientes a dicho evento, en el océano profundo cerca de Australia y bajo el hielo de la Antártida: ¿se trata de cráteres genuinos o son formaciones naturales de roca?

En lo concerniente al episodio de últimos del Triásico, el iridio se encuentra en concentraciones muy limitadas; podría reflejar el impacto de un asteroide de tamaño discreto; de ningún modo asimilable a la escala de mortandad planetaria que se advierte en la frontera K/T.

Ahora bien, si se abandona la tesis de la culpabilidad de los impactos en las extinciones en masa, ¿qué fue lo que desencadenó las grandes mortandades? Un nuevo tipo de prueba revela que la Tierra puede exterminar a sus habitantes y que, con toda probabilidad, lo hizo.

Invernadero devastador

Hace escasos años, geólogos y químicos orgánicos iniciaron una investigación conjunta sobre las condiciones ambientales en momentos críticos de la historia de la Tierra. Su trabajo implicaba la extracción de residuos orgánicos de estratos antiguos en busca de bioindicadores, una suerte de "fósiles" químicos. Algunos organismos nos legan moléculas orgánicas resistentes, que sobreviven a la descomposición de su cuerpo y quedan enterradas en las rocas sedimentarias. Son, pues, bioindicadores de la presencia de organismo extinguidos hace largo tiempo y que no dejaron esqueletos fósiles. Pertenecen a ese grupo microorganismos que nos dejan trazas de los lípidos que conformaron sus membranas celulares (trazas que se detectan mediante nuevas técnicas de espectrometría de masas, un método analítico que separa las moléculas por su masa).

El estudio de los bioindicadores se realizó primero en rocas anteriores a la entrada de animales y plantas en la historia, en parte para determinar cuándo y en qué condiciones apareció la vida en la Tierra. En los últimos años, se ha empezado a muestrear las fronteras de extinciones en masa. Para sorpresa de los investigadores, los datos procedentes de los períodos de extinciones en masa distintos de los del evento K/T sugieren lo siguiente: los océanos habrían retornado, en más de una ocasión, a las condiciones anóxicas que eran habituales antes de que proliferaran plantas y animales.

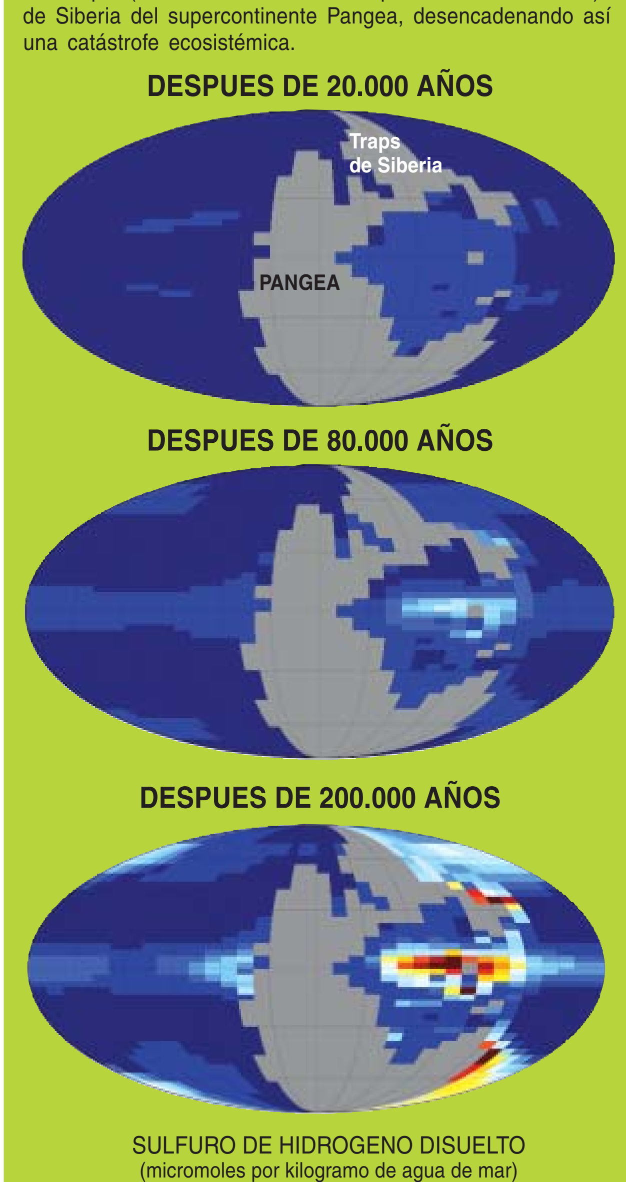
Entre los bioindicadores descubiertos destacan los restos de minúsculas bacterias verdes del azufre fotosintéticas, en su tiempo numerosas. En la actualidad, estos microorganismos medran, junto con las bacterias purpúreas fotosintéticas del azufre, con aquellas emparentadas, en ambientes marinos anóxicos; así, en las profundidades de lagos estancados y del mar Negro.

Se trata de individuos muy insidiosos. Para obtener energía, oxidan sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas que resulta venenoso para la mayoría de las demás formas de vida, y lo convierten en azufre. Por tanto, su abundancia en las fronteras de las extinciones ha abierto el camino para una nueva interpretación del agente causal de las extinciones en masa.

Que alrededor de los períodos de extinción en masa los niveles de oxígeno eran inferiores a los actuales se sabe desde hace tiempo. Pero no acababa de atinarse sobre el motivo. Una actividad volcánica generalizada, asociada a la mayoría de las extinciones en masa, habría elevado los niveles de CO_2 atmosférico; ello habría reducido el oxígeno y conducido a un caldeamiento global intenso.

Envenenamiento lento

Según simulaciones teóricas, al final del Pérmico se produjo un aumento de la concentración de sulfuro de hidrógeno tóxico y una caída gradual del oxígeno en las aguas superficiales de los océanos. El modelo de Katja M. Meyer y Lee R. Kumo, de la Universidad estatal de Pennsylvania, ilustra el efecto ejercido sobre los océanos por el caldeamiento global que proporcionó una actividad volcánica generalizada, iniciada hace unos 251 millones de años en la región de los "traps" (extensiones enormes de plataformas basálticas) de Siberia del supercontinente Pangea, desencadenando así una catástrofe ecosistémica.



KATJA M. MEYER Y LEE R. KUMP *Universidad Estatal de Pennsylvania/Instituto de Astrobiología, NASA*; DAVID FIERSTEIN *(derecha)*

EFECTO INVERNADERO ASESINO

Un nuevo modelo para las extinciones en masa de las postrimerías del Pérmico, hace 251 millones de años, y del Triásico, 50 millones de años después, explica de qué modo un caldeamiento global intenso pudo desencadenar grandes mortandades en mar y tierra firme. Los problemas comienzan con una actividad volcánica generalizada que libera volúmenes ingentes de dióxido de carbono y metano *(1)*. Los gases provocan un calentamiento global rápido *(2)*. Un océano más cálido absorbe menos oxígeno atmosférico *(3)*. La falta de oxígeno (anoxia) desestabiliza la quimioclina, o interfase donde el agua saturada de oxígeno entra en contacto con el agua impregnada del sulfuro de hidrógeno (H_2S) que generan las bacterias anaerobias del fondo *(4)*. A medida que la concentración de H_2S aumenta y cae la de oxígeno, la quimioclina asciende a la superficie oceánica *(5)*. Las bacterias fotosintéticas del azufre, verdes y purpúreas, que consumen H_2S y suelen medrar en las profundidades, habitan ahora en aguas superficiales, ricas en H_2S; los seres vivos oceánicos que respiran oxígeno se asfixian *(6)*. El H_2S se difunde también al aire; mata animales y plantas terrestres *(7)* y sube hasta la troposfera, donde ataca a la capa de ozono *(8)*. Sin la pantalla de ozono, la radiación solar ultravioleta (UV) se encarga de eliminar la vida restante *(9)*.



2. ERUPCIONES DE SULFURO DE HIDROGENO frente a la costa de Namibia. En esta fotografía obtenida por satélite aparecen en forma de remolinos verde pálido sobre la superficie oceánica. Estos episodios locales y frecuentes resultan de la acumulación de sulfuro de hidrógeno en los sedimentos del fondo marino; nos ofrecen una imagen moderna de las condiciones que se dieron durante el afloramiento global propuesto para varios períodos de extinciones en masa: aire con olor de azufre, peces muertos y langostas que, en busca de oxígeno, huyen a las playas intentando escapar del veneno.

JACQUES DESCLOITRES MODIS *Rapid Response Team, Centro de Vuelos Espaciales de la NASA*

(Durante largo tiempo se erigió en hipótesis alternativa a la del impacto del asteroide.)

Ahora bien, las alteraciones producidas por un vulcanismo intenso no explicarían necesariamente las extinciones marinas en masa de finales del Pérmico. Tampoco justificarían la muerte de plantas en tierra firme, pues, con un nivel incrementado de CO_2, la vegetación habría prosperado y, por tanto, sobrevivido al caldeamiento.

Los bioindicadores de los sedimentos oceánicos de las postrimerías del Pérmico y de las rocas más recientes del Triásico aportan pruebas químicas de una proliferación oceánica de las bacterias consumidoras de H_2S. Puesto que estos microorganismos medran sólo en ambientes anóxicos, pero necesitan la luz solar para la fotosíntesis, su presencia en estratos que representan ambientes marinos someros revela que hasta la superficie de los océanos era, a finales del Pérmico, anóxica y rica en H_2S.

En los océanos actuales, el oxígeno se presenta en concentraciones homogéneas, iguales desde la superficie hasta el fondo, porque se disuelve en el agua desde la atmósfera y es transportado hacia el fondo por la circulación oceánica. Sólo en circunstancias insólitas, así las registradas en el mar Negro, las condiciones anóxicas bajo la superficie permiten la vida, en la columna de agua, de una amplia variedad de organismos que no toleran el oxígeno. Estos microorganismos anaerobios que medran en las profundidades producen cantidades copiosas de sulfuro de hidrógeno, que también se disuelve en el agua de mar.

A medida que su concentración aumenta, el H_2S difunde hacia arriba, donde se encuentra con el oxígeno que se difunde hacia abajo. Mientras no se altere este equilibrio, el agua saturada de oxígeno y la que lo está de sulfuro de hidrógeno permanecen separadas; su interfase, la quimioclina, se mantiene estable. Las bacterias del azufre verdes y purpúreas suelen vivir en la quimioclina, donde gozan del suministro de H_2S desde abajo y de luz solar desde arriba.

Según los cálculos de Lee R. Kump y Michael A. Arthur, de la Universidad estatal de Pennsylvania, si la concentración de oxígeno oceánico se reduce, las condiciones empiezan a favorecer a las bacterias anaerobias de las profundidades, que proliferan y, por tanto, aumentan la concentración de sulfuro de hidrógeno. En sus modelos, si la concentración de H_2S en las profundidades hubiera aumentado por encima de un umbral crítico durante un tal intervalo de anoxia oceánica, la quimioclina que separa el agua profunda, rica en H_2S, del agua superficial, oxigenada, habría subido hasta la superficie de forma brusca. Con un resultado terrorífico: se hubieran generado enormes burbujas de H_2S gas que reventarían en la atmósfera.

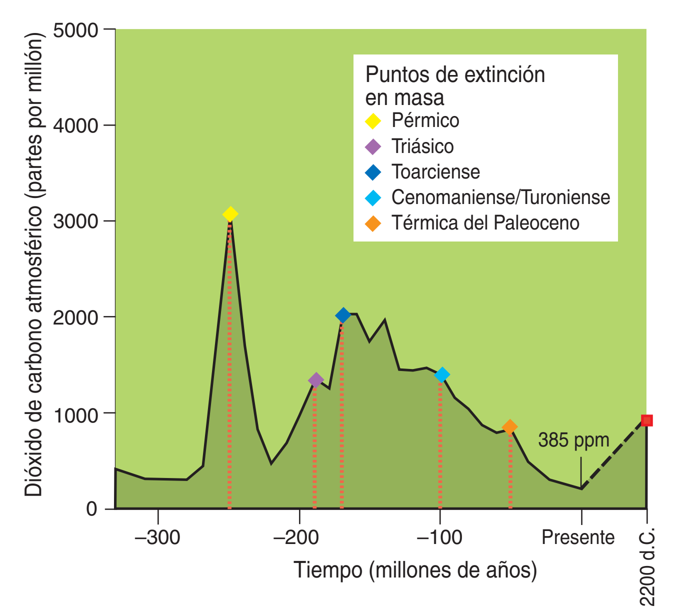
De acuerdo con los trabajos de Kump y Arthur, al final del Pérmico estos afloramientos oceánicos produjeron suficiente H_2S para causar extinciones en tierra firme y en el océano. Pero este gas sofocante no habría sido el único asesino. Los modelos de Alexander Pavlov, de la Universidad de Arizona, muestran que el H_2S habría atacado el escudo de ozono del planeta, una capa atmosférica que protege de la radiación solar ultravioleta (UV) a los seres vivos. Ciertas esporas fósiles de Groenlandia muestran deformaciones provocadas por una exposición prolongada a niveles elevados de UV, lo que constituye una prueba de que la capa de ozono se desgarró cuando concluía el Pérmico.

Podemos hoy comprobar que, por culpa del agujero de la capa de ozono, sobre todo en la Antártida, decae con celeridad la biomasa de fitoplancton. Y si se destruye la base de la cadena alimentaria, no tardarán en hallarse también en apuros los organismos que se encuentran en niveles superiores.

Kump y Arthur estiman que el volumen de H_2S gaseoso que, procedente del océano, entró en la atmósfera de finales del Pérmico fue de más de 2000 veces la cantidad, moderada, que los volcanes emiten en la actualidad. Este gas tóxico habría impregnado la atmósfera en una concentración suficiente para matar a plantas y animales, sobre todo porque la letalidad del H_2S aumenta con la temperatura. Parece que varias extinciones en masa, grandes y pequeñas, tuvieron lugar durante cortos intervalos de caldeamiento global. Aquí es donde pudo haber intervenido la actividad volcánica antigua.

Contemporáneos a múltiples extinciones en masa, hubo episodios volcánicos intensos que arrojaron miles de kilómetros cuadrados de lava sobre los continentes y suelo marino. Un subproducto de esa colosal emisión volcánica sería el enorme volumen de dióxido de carbono y metano que penetró en la atmósfera, lo que habría causado un caldeamiento global inmediato. Durante el Pérmico y el Triásico tardíos, así como en el Jurásico temprano, el Cretácico medio y el Paleoceno

¿ABOCADOS A OTRA EXTINCION?



3. LA CONCENTRACION DE CO_2 ATMOSFERICO era elevada durante las extinciones en masa. El fenómeno respalda la idea de la contribución de este gas al caldeamiento global en tales episodios del pasado. En la actualidad, la concentración de CO_2 se cifra en 385 partes por millón (ppm); se prevé que aumente anualmente en 2 o 3 ppm. Si prosigue la tendencia, al final del siglo próximo el dióxido de carbono atmosférico se hallará cerca de las 900 ppm, justo por debajo de la concentración que había durante la extinción térmica del Paleoceno, hace 54 millones de años.

tardío, entre otros períodos, el registro de isótopos de carbono confirma que las concentraciones de carbono se dispararon justo antes del momento de las extinciones; luego, permanecieron altas cientos de miles de años, si no millones.

Pero el factor determinante debe, verosímilmente, atribuirse a los océanos. El caldeamiento dificulta la absorción oceánica del oxígeno atmosférico. Si el vulcanismo antiguo aumentó el CO_2 y disminuyó la cantidad de oxígeno en la atmósfera, y si el caldeamiento global hizo más difícil que el oxígeno remanente penetrara en los océanos, entonces las condiciones habrían favorecido que las bacterias anaerobias del mar profundo generaran afloramientos masivos de H_2S. La vida marina aerobia hubiera sido la primera en sufrir la agresión, y recibirla con mayor fuerza; en cambio, las bacterias fotosintéticas verdes y purpúreas, consumidoras de H_2S, habrían prosperado en la superficie del océano anóxico. Mientras el gas de H_2S asfixiaba a la biosfera terrestre y erosionaba el escudo protector del planeta, no había forma de vida en la Tierra que se hallara a salvo.

La hipótesis de Kump sobre la mortandad planetaria proporciona una conexión entre las extinciones marinas y las terrestres al final del Pérmico; explica de qué modo el vulcanismo y el CO_2 incrementado pudieron haber desencadenado ambas, y resuelve los extraños hallazgos de azufre por doquier, en un Pérmico expirante. Un océano y una atmósfera emponzoñados darían también cuenta de la lentísima recuperación de la vida después de las extinciones en masa.

Esta secuencia hipotética de acontecimientos no corresponde sólo al final del Pérmico. Una extinción menor, en la época postrera del Paleoceno, hace 54 millones de años, se había ya atribuido a un intervalo de anoxia oceánica, desencadenado por un caldeamiento global a corto plazo. Los bioindicadores y las pruebas geológicas de océanos anóxicos sugieren que eso aconteció al final del Triásico, en el Cretácico medio y en el Devónico tardío. Las extinciones debidas a un efecto invernadero extremo constituyen, por tanto, un fenómeno recurrente en la historia de la Tierra.

¿Tiene nuestra especie algo que temer de este mecanismo en el futuro? Si ocurrió antes, ¿puede repetirse? Aunque seguimos sin saber con certeza las estimaciones sobre tasa de entrada de dióxido de carbono en la atmósfera durante cada una de las extinciones antiguas, sí conocemos los niveles finales a los que tuvieron lugar las extinciones en masa. La extinción térmica en el cierre del Paleoceno empezó cuando el dióxido de carbono atmosférico se hallaba justo por debajo de las 1000 partes por millón (ppm). En las postrimerías del Triásico, el CO_2 superaba ligeramente las 1000 ppm. Hoy, con el CO_2 alrededor de 385 ppm, nos encontramos en zona de seguridad. Pero con el aumento actual del carbono atmosférico (una tasa anual de 2 ppm que se prevé se acelerará a 3 ppm), los niveles podrían acercarse a las 900 ppm cuando vaya a expirar el próximo siglo; para entonces pueden estar ya listas las condiciones que desencadenan la anoxia oceánica. Alcanzada esa cota, ¿cuánto tardará en precipitarse una nueva extinción por efecto invernadero? Esperemos que nuestra sociedad nunca llegue a averiguarlo.

El autor

Peter D. Ward se halla adscrito al departamento de biología de la Universidad de Washington y su división de ciencias de la Tierra y del espacio. Su investigación se centra en las extinciones en masa y en la evolución y extinción de los ammonites. Ward aplica principios decantados del estudio de las formas protobiológicas de la Tierra a la investigación de hábitats potenciales para la vida en otros mundos, en el Instituto de Astrobiología de la NASA.

Bibliografía complementaria

RIVERS IN TIME: THE SEARCH FOR CLUES TO EARTH'S MASS EXTINCTIONS. Peter D. Ward. Columbia University Press, 2002.

ABRUPT AND GRADUAL EXTINCTIONS AMONG LATE PERMIAN LAND VERTEBRATES IN THE KAROO BASIN, SOUTH AFRICA. Peter D. Ward *et al.* en *Science*, vol. 307, págs. 709-714; 4 febrero 2005.

PHOTIC ZONE EUXINIA DURING THE PERMIAN-TRIASSIC SUPERANOXIC EVENT. Kliti Grice *et al.* en *Science*, vol. 307, págs. 706-709; 4 febrero 2005.

MASSIVE RELEASE OF HYDROGEN SULFIDE TO THE SURFACE OCEAN AND ATMOSPHERE DURING INTERVALS OF OCEANIC ANOXIA. Lee R. Kump, Alexander Pavlov y Michael A. Arthur en *Geology*, vol. 33, n.º 5, págs. 397-400; mayo 2005.

Con este nuevo modo de locomoción los robots se mantendrán erguidos y se trasladarán con agilidad a través de las aglomeraciones

Ralph Hollis

ROBOTS MONOBOLA

Robots móviles e inteligentes, que asistan en las tareas domésticas, en la oficina y en residencias para ancianos constituyen el sueño de muchos. Sin embargo, pese a ser un tema recurrente en la fantasía científica, este objetivo siempre parece divisarse a lo lejos. Todavía han de resolverse problemas fundamentales relativos a la percepción, la elaboración de mapas de entorno, el razonamiento automatizado, la manipulación de objetos y la locomoción de los robots.

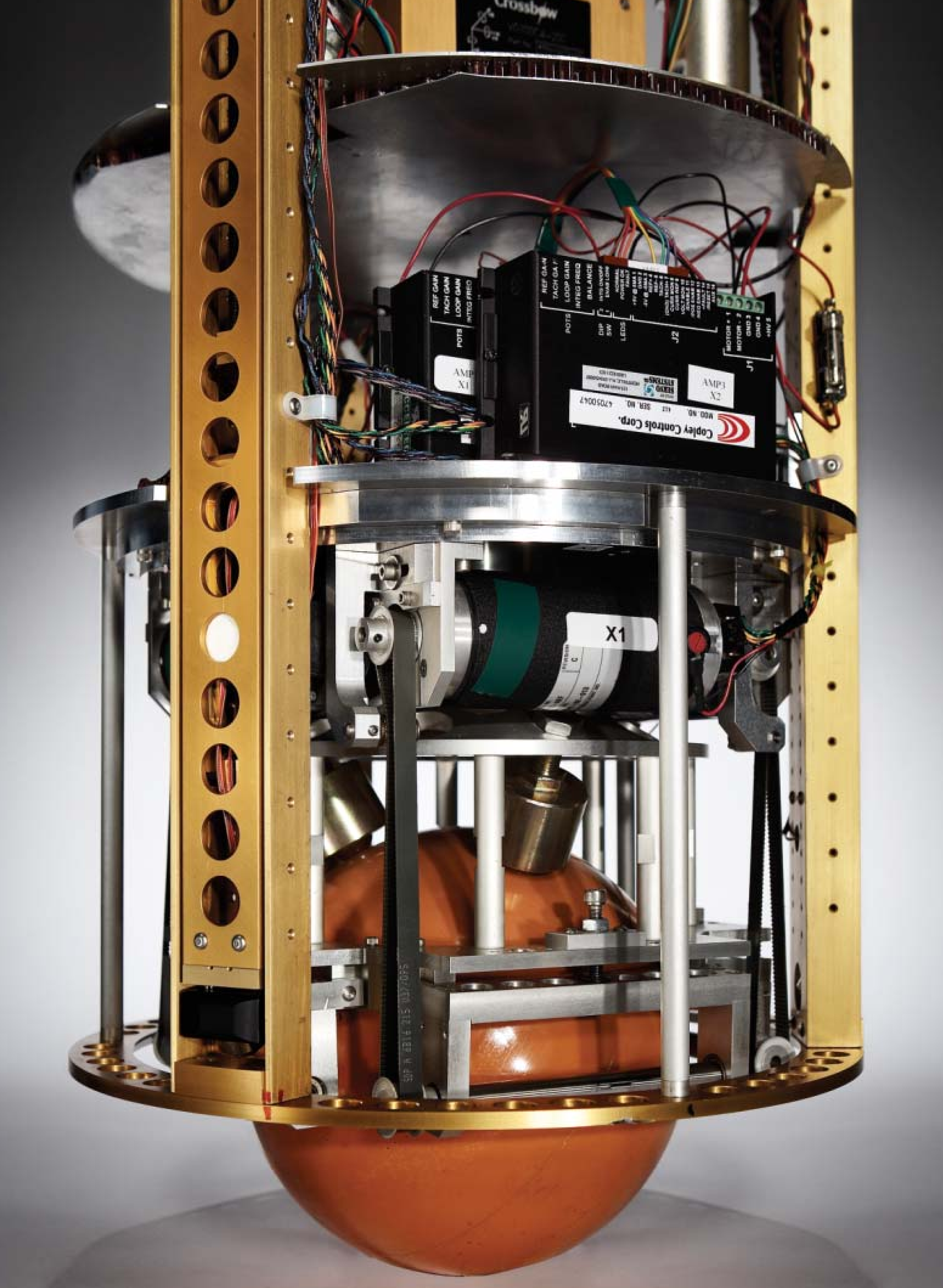
Aunque muy distantes de ese sueño, se han conseguido ya robots que ejecutan tareas complejas. En 2002, se situó un robot a la entrada de la reunión anual de la Asociación Norteamericana para Inteligencia Artificial en Edmonton. El ingenio logró encaminarse al mostrador de recepción, inscribirse en la conferencia, enterarse de la sala que se le asignaba, marchar hasta dicha sala y, por fin, a la hora señalada, pronunciar una breve exposición sobre sí mismo. También se han diseñado robots que operan como guías interactivos en visitas a museos; otros prestan asistencia doméstica a enfermos. Además, a los sistemas móviles se les han añadido brazos y manos para la manipulación de objetos. Todos estos dispositivos experimentales se desplazan sobre plataformas apoyadas en tres o cuatro ruedas. Esa configuración se denomina de "estabilidad estática", porque mantiene la verticalidad del robot, incluso en reposo.

Los robots de altura suficiente para operar en el entorno humano tienen el centro de gravedad elevado; ello les obliga a acelerar y desacelerar con suavidad, y a no recorrer pendientes pronunciadas si se



LA ROBOTICA MOVIL inicia un nuevo camino con un diseño singular: un robot monobola, propulsado por una única rueda esférica.

BRIAN MARANAN PINEDA



Crossbow
REF GAIN
TACH GAIN
LOOP GAIN
INTEG FREQ
BALANCE
POTS
DIP SW
LEDS
J2
J1
MOTOR + 1
MOTOR - 2
GND 3
GND 4
+HV 5
AMP3
X2
X1
Copley Controls Corp.

quiere evitar caídas. Para disminuir ese riesgo, los robots de estabilidad estática suelen estar dotados de un cuerpo grueso apoyado en plataformas rodantes amplias; pero estas formas restringen enormemente su movilidad a través de las puertas y alrededor de muebles o personas.

Hace varios años, el autor se propuso prescindir de estas anchas plataformas. Para ello diseñó y construyó un robot alto, flaco y ágil, que mantiene el equilibrio; está propulsado por una rueda esférica. Con el centro de gravedad alto, esa máquina sencilla se movería con presteza en cualquier dirección. El sistema dependería de un equilibrio activo; sería, por ello, de "estabilidad dinámica": se mantendría erguido sólo a costa de corregir continuamente su postura corporal. Nacía así una clase nueva de robot móvil rodante: el robobola ("ballbot", robot bola).

El grupo que dirige el autor viene ensayando el "robobola" desde hace más de un año. Han estudiado las propiedades de estabilidad y la aptitud para operar en entornos humanos. Numerosos visitantes del laboratorio han encomiado el ingenio por su extraña capacidad de equilibrio y desplazamiento sobre una única rueda esférica.

Mantener el equilibrio

Los humanos mantenemos el equilibrio merced al sentido vestibular que radica en el oído interno. Esta información se combina con la que procede de otros sentidos, como la vista, para controlar los músculos de piernas y pies que nos permiten estar derechos y no caer. Un robot monobola conserva el equilibrio de forma análoga.

Ante todo, la máquina debe tener un objetivo que alcanzar: por ejemplo, permanecer en un lugar o desplazarse en línea recta entre dos posiciones. En segundo término, deberá conocer siempre la dirección de la gravedad y ser capaz de determinar la orientación de su cuerpo con respecto a esa referencia vertical. En tercer lugar, deberá incorporar medios para hacer girar la bola en cualquier dirección y medir su recorrido por el suelo. Por último, contará con un método de control que procese los datos medidos por los sensores, para generar instrucciones de rotación de la bola que intenten lograr el objetivo.

La cuestión de la "verticalidad" constituye un problema histórico. El robobola aprovecha los avances recientes en computación, fibra óptica y sistemas microelectromecánicos (MEMS), que han permitido fabricar a bajo coste dispositivos que emulan la función del giróscopo de rotación tradicional.

Se utiliza un sistema que incorpora tres giróscopos de fibra óptica montados ortogonalmente (perpendiculares entre sí) en una caja rígidamente unida al cuerpo del robot. Tales giróscopos no contienen masas giratorias; cada uno comprende una fuente luminosa, un detector y una bobina de fibra óptica. Las ondas de luz se propagan por la bobina en direcciones opuestas; se interfieren luego entre sí en el detector. Durante la operación, el cuerpo del robot, con sus tres sensores de movimiento angular giroscópicos, rota en direcciones distintas; pero las ondas luminosas en su interior viajan a velocidad fija, sea cual fuere el movimiento. Según esto, en cada sensor se produce una pequeña diferencia de trayectos entre las ondas que se propagan en sentidos dextrógiro y levógiro.

Esa diferencia de trayectos hace desplazar, en cada caso, las franjas de interferencia en el detector; ello produce una señal de salida proporcional a la velocidad angular. (En 1913 Georges Sagnac señaló ya este efecto.) Un pequeño ordenador integra las tres velocidades angulares para proporcionar los tres ángulos que posicionan el cuerpo del robot: el de cabeceo ("pitch", inclinación de atrás a delante), el de balanceo ("roll", inclinación de izquierda a derecha) y el de guiñada ("yaw", rotación en torno a la vertical).

Para proporcionar la orientación vertical correcta, todos los giróscopos han de tener en cuenta la rotación terrestre. Además, están sujetos a multitud de efectos de escasa magnitud que, con el tiempo, originan errores y derivas.

El sistema incorpora tres acelerómetros MEMS; se disponen ortogonalmente en la misma caja, al lado de los giróscopos. Al moverse el robot, estos sensores comunican los valores instantáneos de aceleración resultantes para cada orientación; el ordenador combina luego estos valores para proporcionar una dirección y magnitud de la aceleración total, que se promedia en el tiempo. (Las lecturas del acelerómetro no son directamente utilizables para conseguir el equilibrio.) De ahí se obtiene un indicador fiable, a largo plazo, de la dirección de la gravedad, que el sistema utiliza para corregir la deriva de los giróscopos de fibra óptica.

Moverse con la bola

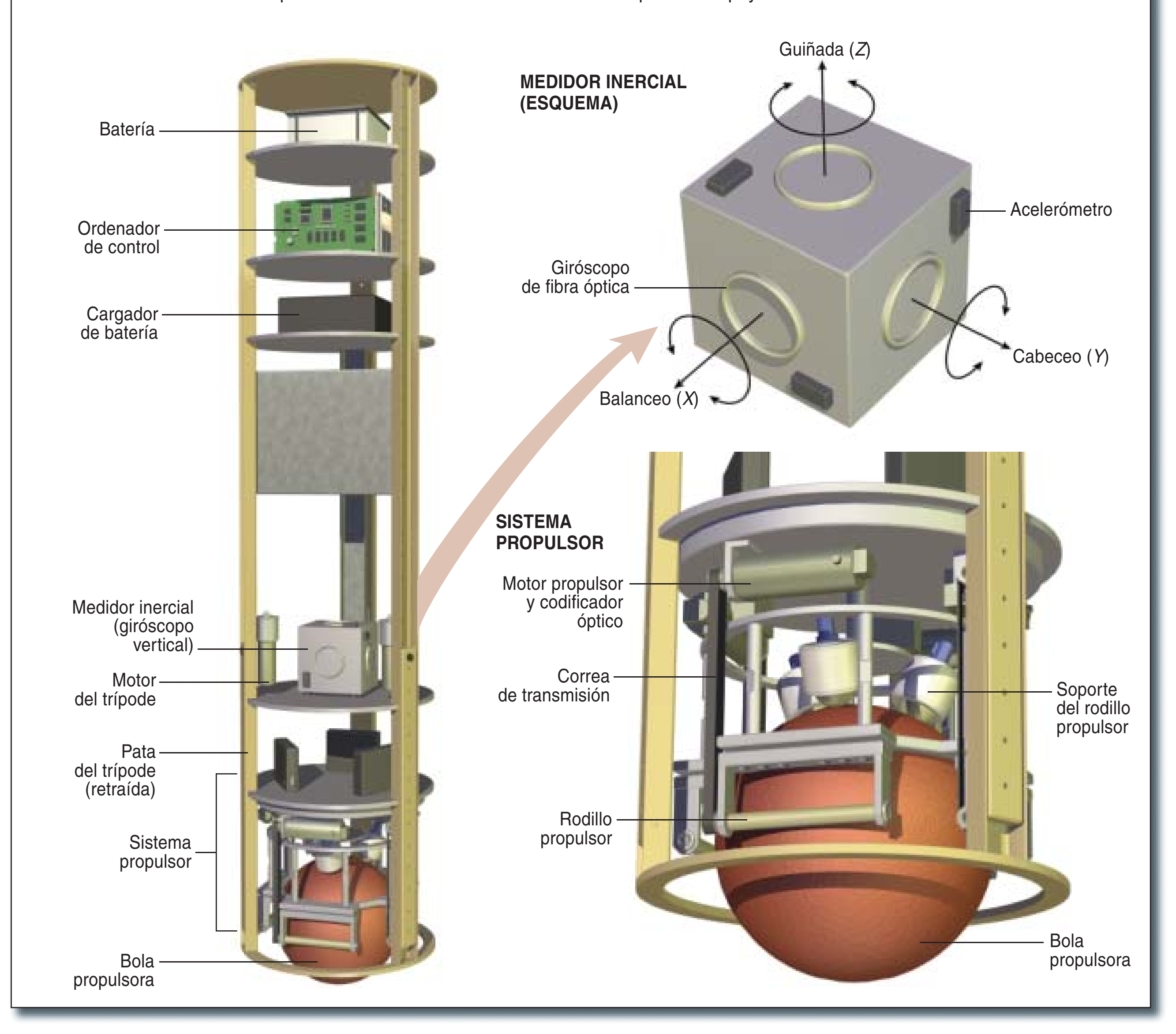
Hay varios procedimientos para mover una bola en diversas direcciones por medio de motores. El mecanismo propulsor del robobola busca la mayor sencillez. Cuando desplazamos sobre la mesa el ratón mecánico del ordenador, la bola forrada de goma que tiene debajo hace girar dos rodillos montados ortogonalmente. La medición del giro de los rodillos entra en el ordenador para que éste desplace el cursor a través de la pantalla. En el robobola ocurre exactamente lo contrario: la salida del ordenador del robot ordena a un juego de motores que hagan girar los rodillos para que ruede la bola, y de ese modo haga desplazarse al robot por el suelo en cualquier dirección.

Resumen/Robots móviles

- Para interactuar con las personas en su entorno habitual, los robots móviles inteligentes deben mantenerse erguidos y moverse con seguridad y elegancia.
- La mayoría de los robots móviles experimentales se asientan en grandes plataformas rodantes; ello dificulta sus movimientos por espacios estrechos y desordenados.
- Un "robobola", un robot alto y delgado que se mueve con rapidez en cualquier dirección sobre una bola rodante, puede ofrecer la flexibilidad de locomoción que los futuros robots necesiten para asistir a las personas en su quehacer diario.

ARQUITECTURA DEL ROBOBOLA

En cierto modo, el robobola (*izquierda*) guarda semejanza con un bolígrafo que midiera metro y medio de altura. Unos giróscopos y acelerómetros de fibra óptica (*arriba, derecha*) montados ortogonalmente entre sí para detectar movimientos en las direcciones de cabeceo, balanceo y guiñada, generan los datos de orientación vertical que el sistema de control informático necesita para determinar cómo ha de mantenerse el equilibrio. El mecanismo de gobierno de la bola (*abajo, derecha*), que opera como un ratón (de ordenador) invertido, proporciona la fuerza motriz del robot. Los rodillos motorizados hacen girar la bola, cuyo desplazamiento miden unos codificadores ópticos. Para mantener la verticalidad una vez que la máquina se apaga, se despliega un trípode de apoyo.



GEORGE RETSECK

En esencia, viene a ser una "bola de ratón" invertida.

Los motores actuales controlan la bola en las direcciones de cabeceo y balanceo. Un motor adicional (aún no instalado) hará girar el cuerpo en guiñada; el robobola podrá entonces orientarse a cualquier dirección.

Como un payaso de circo encaramado sobre una pelota, el cuerpo del robot se mantiene en lo alto de una bola rodante. La bola no es más que una esfera hueca de aluminio recubierta por una gruesa capa de poliuretano elástico. Este tipo de propulsión está sujeto a rozamiento y amortiguamiento por los inevitables deslizamientos entre la bola y los rodillos; habrá pues que compensar estos efectos. Entre la bola y el cuerpo se sitúan tres cojinetes que soportan el peso del cuerpo.

Para deducir la rotación de la bola y, a partir de ahí, la distancia recorrida, se utilizan codificadores ópticos montados sobre cada motor propulsor. Cada codificador cuenta con una fuente luminosa fija opuesta a un detector de luz. Entre ellos se asienta una máscara giratoria transparente (con multitud de franjas opacas finas), que es solidaria del árbol motor. Al girar el motor, gira también la máscara; ello hace que el patrón de franjas bloquee y transmita alternativamente el haz luminoso. El ordenador principal del robot cuenta estos eventos para calcular la rotación de la bola y, de ahí, la distancia recorrida.

El problema de la vertical

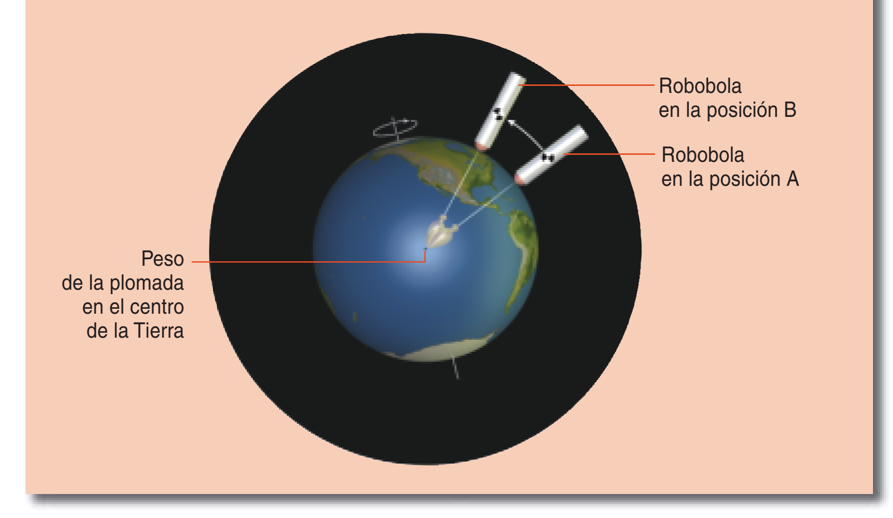
Determinar la orientación vertical en cada punto, lo que desde los primeros tiempos de la aviación se denomina “el problema de la vertical”, sigue siendo difícil hoy mismo. Un simple peso de plomo pendiente de un hilo marca la vertical, pero no serviría de referencia a un robot monobola, puesto que al desplazarse de un punto a otro (de A a B en la ilustración inferior) el peso de plomo oscilaría a un lado y otro, a la manera de un péndulo.

Otra alternativa sería el giróscopo. La rueda del giróscopo se apoyaría en cojinetes, que dejarían al eje libertad de orientación. Accionando la rueda con un motor, ésta giraría rápidamente con el eje en vertical antes que el robot empezase a funcionar. La inercia del giróscopo lo mantendría apuntando a la misma dirección, a pesar del movimiento. Mediante la incorporación de sensores angulares en los cojinetes de suspensión, se medirían las posiciones de cabeceo (adelante/atrás) y de balanceo (izquierda/derecha) que adoptara el cuerpo del robot. El método, sin embargo, no está exento de problemas. El eje del giróscopo permanecería fijo en el espacio mientras la Tierra describe su rotación; por tanto, se apartaría de la vertical.

El ingeniero alemán Maximilian Schuler fue el primero en presentar una solución al problema de la vertical en 1923. Imaginó un péndulo de hilo tan largo, que llegara al centro de la Tierra; éste mantendría su verticalidad, pese a cualquier desplazamiento. El péndulo tendría un período de unos 84,4 minutos. Schuler demostró que los pares de fuerzas pequeños ejercidos sobre un giróscopo aumentarían hasta 84,4 minutos el período de un péndulo corto (y harían que se comportara como un péndulo de Schuler); ello le mantendría orientado en la dirección de la gravedad.

El robobola podría incorporar un giróscopo de este tipo equipado de un péndulo corto. Al moverse el robot, las direcciones de oscilación del péndulo se medirían a lo largo del tiempo; se obtendría después un valor promedio que representaría fielmente la vertical (porque las aceleraciones laterales se compensan con el tiempo y dejan la gravedad como valor dominante). El resultado se aprovecharía para ejercer sobre el giróscopo pares de fuerzas que lo mantendrían en posición vertical.

Pero el autor optó por otra solución: giróscopos de fibra óptica y acelerómetros microelectromecánicos que juntamente emulan las funciones de un giróscopo mecánico y un péndulo que se comporta como péndulo de Schuler. El resultado es un giróscopo “vertical”, que busca la dirección de la gravedad y, por tanto, sirve de referencia para el equilibrio.



GEORGE RETSECK

Control de la bola

En términos sencillos, el robot monobola determina, valiéndose de su conocimiento de la vertical, cómo ha de girar su bola para mantenerse en equilibrio y moverse de un lado a otro. El robobola corresponde, en esencia, a un péndulo invertido (mecanismo bien estudiado en la física). Se ha aplicado la teoría del control óptimo para hallar una estrategia que conduzca el robot a su objetivo y lo alcance con el mínimo esfuerzo. El procedimiento ha de tener en cuenta los ocho estados internos del robot: cuatro para el movimiento de cabeceo (de delante a atrás) y cuatro para el movimiento de balanceo (de izquierda a derecha). Para cada una de esas direcciones, el sistema mide o infiere (a partir de los sensores incorporados) la posición y la velocidad del robot, así como la inclinación del cuerpo y su tasa de variación.

Para describir la dinámica de este robot se emplea un modelo matemático lineal simplificado. Rudolf Kalman, teórico de sistemas matemáticos de origen húngaro, ideó en 1960 un método elegante para deducir modos de controlar esos sistemas; lo denominó regulador cuadrático lineal. El método considera que las mediciones de los estados internos del sistema son proporcionales a los propios valores de los estados. Supone, además, que los estados varían con el tiempo, a una velocidad proporcional a los valores de esos estados más una contribución proporcional a cualquier acción de control que pudiera ejercerse, tal como un par motor.

La técnica de Kalman minimiza una función integral sobre el tiempo, formada por la suma de una medida cuadrática de los estados y una medida cuadrática de las acciones de control. La solución proporciona un conjunto final de constantes, que, al multiplicarse por cada uno de los estados internos, determina la acción recomendada u óptima que ha de realizar el robobola en cada instante. Estos cálculos se ejecutan varios cientos de veces por segundo en el ordenador principal del robot.

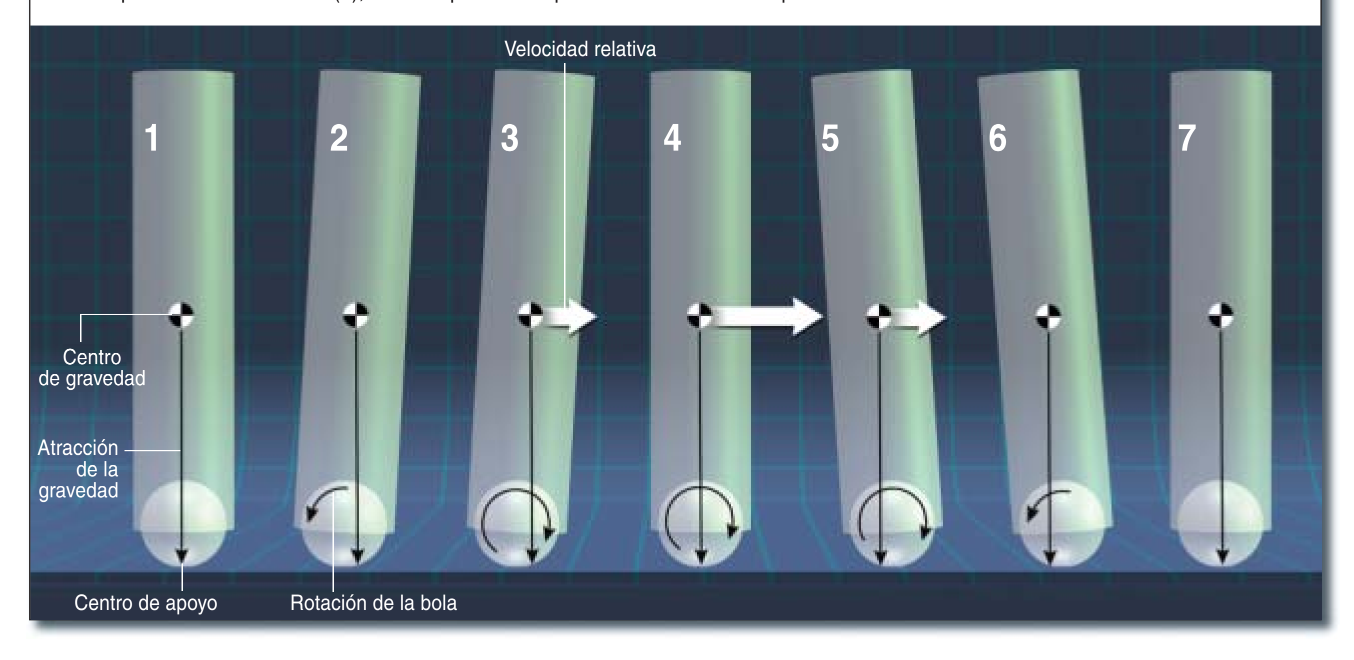
Cuando el objetivo del robobola es quedarse inmóvil, su sistema de control intenta llevar a cero, de forma simultánea en todas las direcciones, la posición y la velocidad del cuerpo, así como su inclinación y la variación de la misma; y todo ello con las mínimas acciones necesarias. Cuando lo que se desea es ir de un sitio a otro, el control gira automáticamente la bola en retroceso para conseguir una inclinación del cuerpo que le permita acelerar en avance hasta la posición vertical. Cuando se aproxima a la posición deseada, una nueva aceleración automática de la bola invierte la inclinación y devuelve el robot al reposo.

Perspectivas de progreso

Hemos empezado ya a ensayar con el robot. Los investigadores se comu-

VIAJAR DE UN PUNTO A OTRO

Para guardar el equilibrio en la posición de parada, el robobola debe mantener su centro de gravedad directamente sobre su centro de apoyo (*1*). Los sensores de orientación determinan la dirección vertical; la máquina la compara luego con su posición actual. Durante el movimiento, el robot manipula su centro de gravedad para lograr el mejor resultado. Por ejemplo, para ir de un punto a otro en el suelo, la bola propulsora gira primero ligeramente en la dirección opuesta al desplazamiento deseado (*2*), con lo que el cuerpo se inclina levemente hacia delante para iniciar la marcha. A continuación, la rueda gira en la dirección de avance para acelerar en el sentido de la marcha (*3*). Cuando el robobola avanza a velocidad constante, el cuerpo debe mantenerse casi vertical (*4*). Para desacelerar la máquina (*5*) y preparar luego su detención (*6*), deben producirse las acciones opuestas, que, unidas, la conducen a la parada (*7*). En las pendientes, el cuerpo del robot debe inclinarse para mantener el equilibrio.



GEORGE RETSECK

nican con él mediante una conexión inalámbrica, por radio. El próximo paso consiste en añadirle un par de brazos y una cabeza que gire y se incline, con un sistema de visión binocular y muchos otros sensores. Se trata de lograr que la máquina se convierta en un robot hábil, con un grado notable de autonomía. El autor y su equipo se proponen comprender hasta qué punto estos robots se desenvuelven bien en un entorno humano normal, para compararlos cuantitativamente en prestaciones, seguridad y aptitudes de navegación con los robots de estabilidad estática tradicionales. Creemos que estos últimos podrían alcanzar su techo evolutivo cuando tengan que operar en tales entornos.

Pero no somos los únicos que apostamos por los robots de estabilidad dinámica. Otros grupos han creado robots de dos ruedas con estabilidad dinámica en la dirección de cabeceo pero estática en la de balanceo. Aunque esos robots, a diferencia de un robobola, no sean omnidireccionales, sí aspiran a moverse con agilidad, sobre todo en espacios exteriores.

A largo plazo quizá predominen los robots bípedos dinámicamente estables, en forma humanoide, sobre todo por su aptitud para recorrer escaleras. Expertos de todo el mundo trabajan con ahínco para desarrollar estas máquinas tan complejas y a menudo costosas. Mientras tanto, parece que los robobolas servirán para el estudio de la interacción entre robots móviles y seres humanos, allá donde éstos vivan.

El autor

Ralph Hollis es profesor de investigación en el Instituto de Robótica de la Universidad Carnegie Mellon. Ostenta un cargo en el departamento de ingeniería eléctrica e informática del mismo centro. En 1975 se doctoró en física del estado sólido por la Universidad de Colorado en Boulder. Su investigación se centra en el microensamblaje de productos electromecánicos, la interacción humano-computador a través del sentido del tacto y los robots móviles con estabilidad dinámica.

Bibliografía complementaria

INVENTING ACCURACY: A HISTORICAL SOCIOLOGY OF NUCLEAR MISSILE GUIDANCE. Reimpresión. Donald MacKenzie. MIT Press, 1993.

A DYNAMICALLY STABLE SINGLE-WHEELED MOBILE ROBOT WITH INVERSE MOUSE-BALL DRIVE. T. B. Lauwers, G. A. Kantor y R. L. Hollis en *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '06)*, mayo de 2006.

ONE IS ENOUGH! Tom Lauwers, George Kantor y Ralph Hollis en *Robotics Research: The Twelfth International Symposium*. Springer Tracts in Advanced Robotics (en prensa).

Acuaporinas: los canales de agua celulares

Las acuaporinas regulan el paso del agua a través de la membrana celular. Forman una familia de proteínas muy diversa; se hallan presentes en todos los seres vivos. Abundan sobre todo en plantas y en el sistema renal de animales

Miriam Echevarría y Rafael Zardoya

El agua, el compuesto más abundante de nuestro cuerpo, es esencial para la vida. Todos los iones, lípidos, azúcares, proteínas y otras macromoléculas que forman parte de las células y su entorno se encuentran disueltos en medio acuoso. Para realizar las funciones que hacen posible la vida, las células deben incorporar nutrientes, hormonas, iones y gases. Y deben también expulsar sustancias de desecho.

Ese intercambio de materia con el entorno se realiza a través de la membrana. Opera un mecanismo de difusión pasiva o se recurre a proteínas transportadoras específicas. La circulación de iones y otras moléculas provoca una distribución desigual de estas sustancias a un lado y otro de la membrana celular.

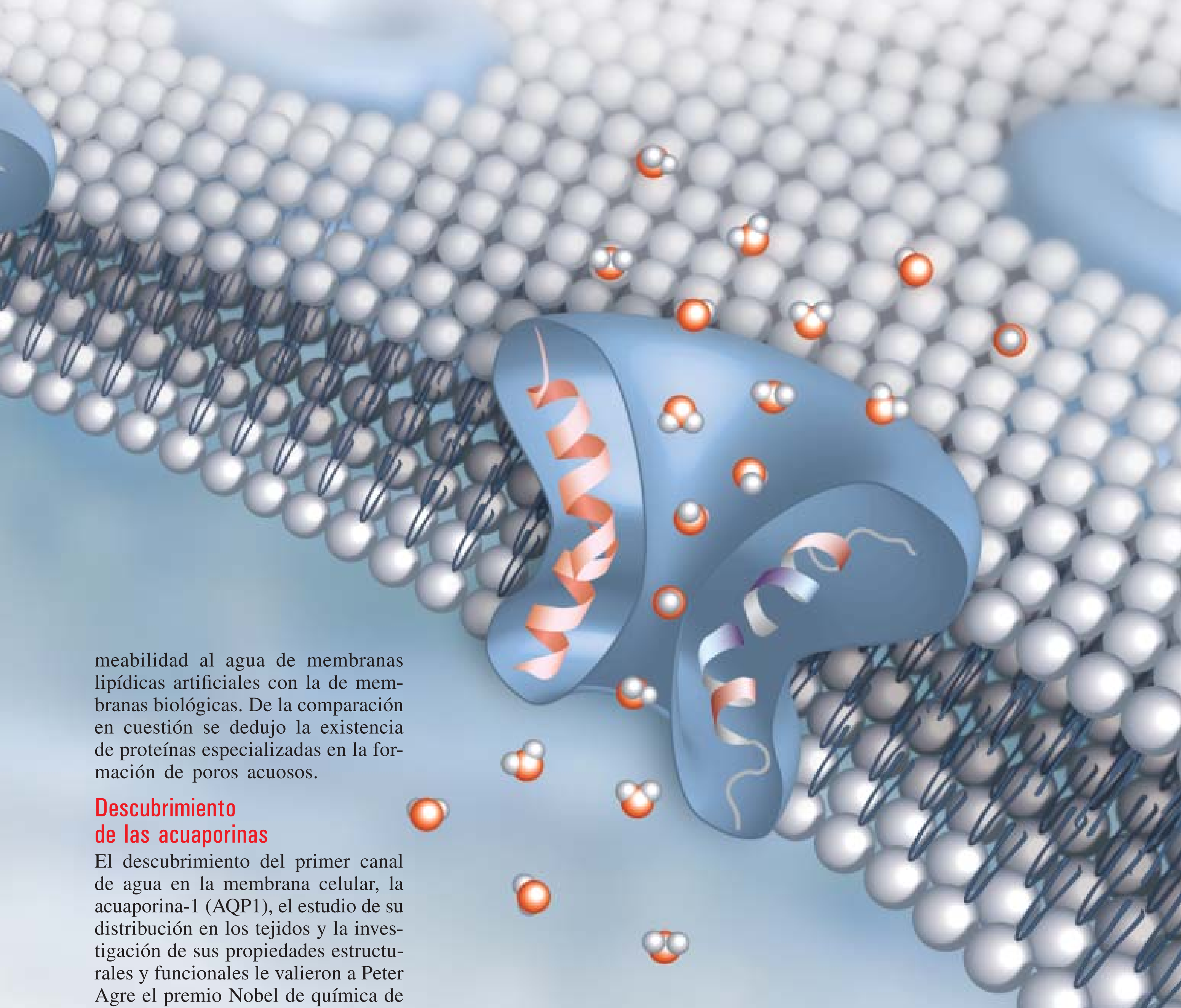
El transporte genera un flujo de agua a través de la membrana. La entrada y salida de agua cambia el volumen de la célula, amén de modificar la composición del medio intracelular y extracelular. Entender cómo el agua atraviesa las membranas celulares en nuestro cuerpo ha constituido una de las cuestiones de mayor interés en biología.

Los primeros modelos teóricos

Ya en 1895, Charles Overton publicó un extenso estudio sobre las propiedades osmóticas de las células, vegetales y animales; analizaba allí el efecto ejercido por más de 500 compuestos químicos en el flujo del agua a través de la membrana celular. Desde entonces, y durante muchos años, se creyó que el agua podía atravesar la membrana celular por difusión pasiva entre los lípidos que constituyen dicha estructura.

Pero la difusión pasiva no permitía explicar la permeabilidad al agua que muestran los glóbulos rojos y las células del túbulo renal; aquí, el flujo de agua a través de la membrana en presencia de un gradiente de concentración era superior al flujo en ausencia de dicho gradiente. Además, la energía disipada por la interacción entre agua y membrana se acercaba a la del movimiento del agua en solución libre. Se descubrió también que el paso del agua a través de estas membranas podía bloquearse mediante fármacos derivados de compuestos mercuriales.

Todas esas observaciones, sumadas a las realizadas en membranas artificiales, permitieron comparar la per-



meabilidad al agua de membranas lipídicas artificiales con la de membranas biológicas. De la comparación en cuestión se dedujo la existencia de proteínas especializadas en la formación de poros acuosos.

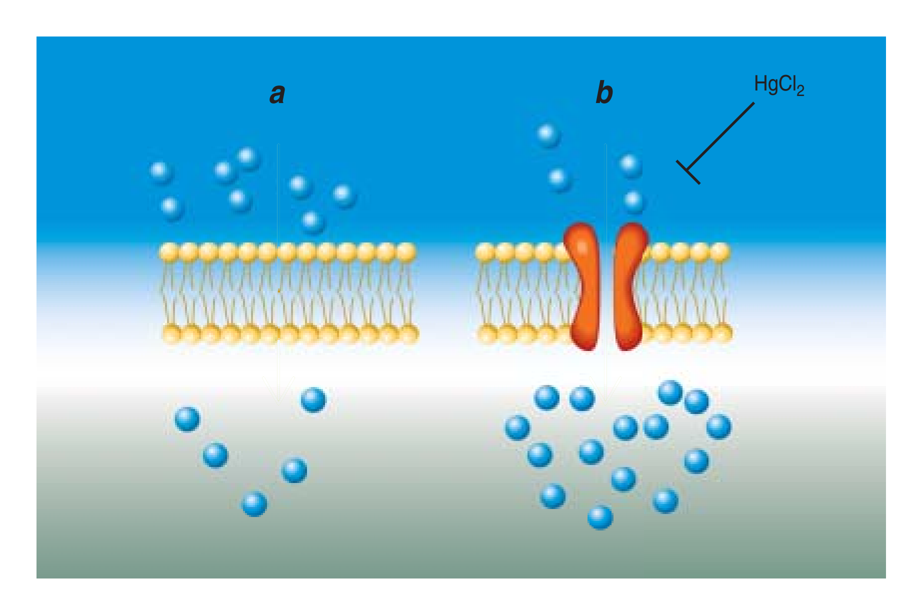
Descubrimiento de las acuaporinas

El descubrimiento del primer canal de agua en la membrana celular, la acuaporina-1 (AQP1), el estudio de su distribución en los tejidos y la investigación de sus propiedades estructurales y funcionales le valieron a Peter Agre el premio Nobel de química de 2003. Agre y su equipo, de la Universidad Johns Hopkins, estudiaban en 1988 las proteínas de la membrana de los eritrocitos. Durante sus trabajos de purificación de la proteína de 32 kilodalton que determina el grupo sanguíneo Rh, encontraron un polipéptido de peso molecular inferior (28 kilodalton) que copurificaba con su proteína de interés. Pensaron que correspondía a un subproducto de la hidrólisis de la proteína Rh. Pero el análisis estructural de la molécula de 28 kilodalton, abundante en glóbulos rojos y en células del túbulo proximal del riñón, reveló que se trataba de una nueva proteína integral de membrana. Sin relación alguna con la proteína Rh.

Hasta 1992 no descifraron la función de la proteína. Denominada en un comienzo CHIP28, abreviación de proteína integral de 28 kilodalton formadora de canales, recibiría más tarde el nombre de AQP1.

En sus trabajos hallaron que los ovocitos de la rana *Xenopus laevis* inyectados con cantidades exiguas de ARN mensajero de AQP1 desarrollaban una permeabilidad al agua superior a la de un ovocito control sin inyectar o inyectado con agua. Se descubrió también que la permeabilidad al agua dependiente de AQP1 se inhibía mediante cloruro de mercurio y que tal efecto se revertía con agentes reductores.

El comportamiento reseñado correspondía al esperado para un flujo de agua mediado por canales. Se percataron entonces de que habían descubierto, por fin, la proteína del canal de agua. La presencia de AQP1 justificaba la elevada permeabilidad al agua de la membrana del hematíe y del túbulo proximal renal. Pero, ¿cómo explicar la reabsorción de agua dependiente de la hormona vasopresina en el segmento más distal de la nefrona, el túbulo colector y en otros tejidos que no poseen esta proteína? La identificación molecular de AQP1 fue el detonante de la bús-



1. EL PRIMER MODELO que describía la circulación de agua a través de la membrana celular data de 1895. Según éste, el agua se escurría por difusión pasiva entre los lípidos (*amarillo*) que constituyen la membrana (*a*). El estudio de la influencia del gradiente, la energía disipada por la interacción del agua con la membrana, el bloqueo de compuestos mercuriales y la comparación de membranas puramente lipídicas con membranas biológicas llevó a proponer la existencia de proteínas (*rojo*) especializadas en la formación de poros hídricos (*b*).

queda que condujo al descubrimiento de las trece acuaporinas que hoy se conocen en humanos.

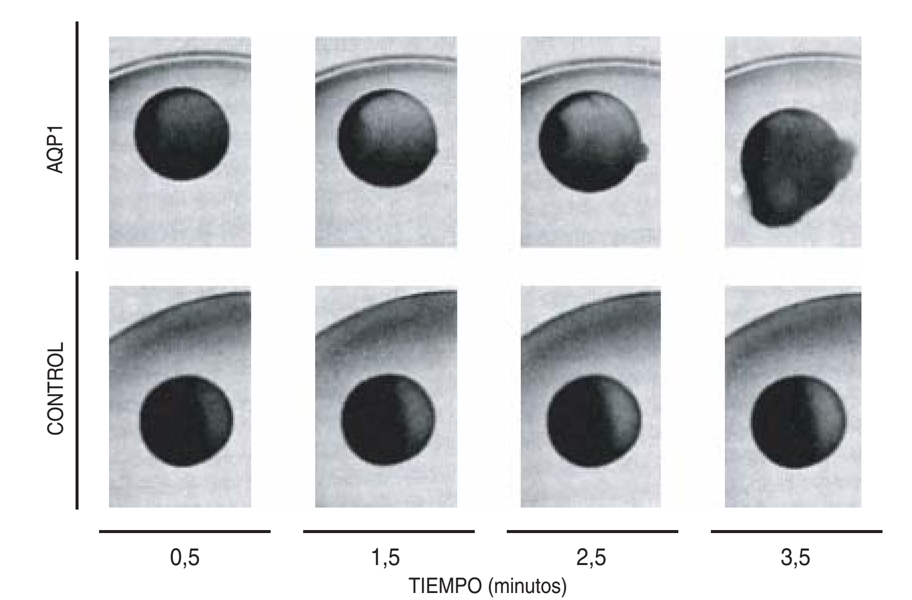
Lo primero que llamó la atención, al comparar la secuencia de AQP1 con las almacenadas en el banco de genes, fue su estrecha semejanza con miembros de una familia de proteínas integrales de membrana (PIM); entre ellas, la proteína Big Brain de *Drosophila*, la Nodulina26 de la semilla del género *Glycine*, el transportador de glicerol GLpF de *Escherichia coli* y PIM, una proteína de 26 kilodalton que abunda en el cristalino bovino, que da nombre a la familia. AQP1 comparte con ellas varios aminoácidos en determinadas posiciones de la secuencia: todos los miembros de la familia PIM mostraban el triplete asparragina-prolina-alanina (NPA) repetido dos veces, además de otros aminoácidos individuales a lo largo de la secuencia, muy conservados.

AQP1 consta de dos grandes dominios, imagen especular uno de otro, con un triplete NPA presente en cada mitad, el primero en un lazo intracelular y el segundo en uno extracelular. Se procedió luego a la clonación sucesiva de otras acuaporinas que, en conjunto, forman la familia de proteínas integrales de membrana responsables del transporte de agua. Se nombraron desde AQP2 a AQP12; la proteína PIM se denominó AQP0.

Se siguió el mismo protocolo de clonación para todas ellas. De los tejidos donde se sospechaba la existencia de un nuevo canal de agua se extrajo ARN. A partir de éste se obtuvo, por transcripción inversa, el ADN complementario. El ADNc se utilizó como molde en una reacción en cadena de la polimerasa, junto con cebadores que reconocerían y se hibridarían a las regiones NPA de cualquier miembro de la familia PIM presente en la muestra de ARN. El grupo de Agre clonó las proteínas AQP1, AQP4, AQP5 y AQP6; el de Sei Sasaki, de la Universidad de Medicina y Odontología de Tokio, identificó las secuencias de AQP2, AQP7, AQP8, AQP9, AQP10, AQP11 y AQP12. En la identificación de AQP3 intervino uno de los autores (Miriam Echevarría).

Un reloj de arena

El tamaño de las acuaporinas suele oscilar entre 250 y 300 aminoácidos. Muy hidrofóbicas, se organizan en seis segmentos de estructura α-hélice que atraviesan la membrana de lado a lado, unidos por cinco lazos conectores. Dos de los lazos (uno extracelular y otro intracelular) se pliegan hacia la membrana y se aproximan para formar el poro. La estructura resultante encierra una zona central estrecha que se ensancha abriéndose hacia ambos lados de la membrana. Este particular plegamiento, en forma de reloj de arena, pone en contacto los tripletes NPA para formar el sitio más estrecho del poro. Aunque cada acuaporina constituye por sí sola un canal, en la membrana celular estas proteínas se ensamblan en grupos de cuatro.



2. OVOCITOS DE LA RANA *Xenopus laevis* inyectados con cantidades reducidas de ARN mensajero de acuaporina-1 (0,1-10 ng). Muestran una permeabilidad al agua superior a la de un ovocito control no inyectado o inyectado con agua.

MIRIAM ECHEVARRIA Y RAFAEL ZARDOYA

Por fin, el grupo de Fujiyoshi Yoshinori, de la Universidad de Kyoto, Andreas Engel, de la Universidad de Basilea, y Agre, determinaron la estructura molecular de AQP1 con una resolución de 3,8 angstrom. A partir de este análisis tridimensional se determinó una correlación directa entre aminoácidos específicos y estructura proteica. Los seis segmentos α-hélice transmembranales conforman una suerte de ramo en el que los segmentos se hallan levemente inclinados y girados hacia la derecha. La estructura se mantiene estable merced a los grandes ángulos de cruce de los segmentos transmembrana y a la interacción en los sitios de cruce de glicinas altamente conservadas. Los lazos que conforman la zona central, que también son α-hélices cortas, se proyectan hacia el centro del ramo en ángulo de casi 90 grados para crear la barrera de permeabilidad del canal. Ambos lazos interaccionan a través del triplete NPA y se mantienen en contacto mediante fuerzas de van der Waals entre sus prolinas. Dos asparraginas convergen para delimitar el sitio más estrecho del canal, de unos 3 angstrom de diámetro. El diámetro de la molécula de agua es ligeramente inferior: 2,8 angstrom.

Otros aminoácidos conforman el centro del poro acuoso: una isoleucina de la α-hélice 2, una fenilalanina de la α-hélice 1, una leucina de la α-hélice 4 y una valina de la α-hélice 5. Cerca de este sitio, por el lado extracelular del poro, se encuentra la cisteína responsable de la sensibilidad de AQP1 a compuestos mercuriales.

El resto de las paredes que forman la superficie del canal acuoso corresponden a aminoácidos de los segmentos transmembrana 1, 2, 4 y 5. Los segmentos 3 y 6 constituyen las hélices más periféricas del canal; quedan encarados hacia los lípidos de la membrana.

ACUAPORINAS	DISTRIBUCION	
AQP0	Ojo (cristalino)	
AQP1	Eritrocitos Cerebro Riñón Tráquea Corazón Placenta Utero	Uréter y vejiga urinaria Pulmón Bronquios Conductos biliares Piel Endotelio capilar (excepto cerebro) Ojo
AQP2	Túbulo conector y colector renal	Uréter y vejiga urinaria
AQP3	Túbulo colector renal Tracto gastrointestinal Hígado Páncreas Bazo Próstata Uréter y vejiga urinaria	Ojo Glándula lacrimal y sudorípara Pulmón Células meníngeas Eritrocitos Utero
AQP4	Cerebro Tracto gastrointestinal Túbulo colector renal Médula espinal Oído	Pulmón Músculo esquelético Ojo (retina, iris, cuerpo ciliar) Glándula lacrimal
AQP5	Glándula salival Glándula lacrimal Pulmón	Tracto gastrointestinal Córnea Ojo
AQP6	Riñón	
AQP7	Espermátidas tardías y espermas maduros Testículo Tejido adiposo	Túbulo proximal renal Corazón Músculo esquelético
AQP8	Hígado Páncreas Testículo Placenta Utero	Glándula salival Intestino delgado Colon Corazón
AQP9	Tejido adiposo Corazón Colon Leucocitos Hígado Cerebro	Médula ósea Riñón Intestino delgado Pulmón Bazo Testículo
AQP10	Intestino delgado	

3. DISTRIBUCION TISULAR de las acuaporinas de mamíferos (y posiblemente vertebrados).

MIRIAM ECHEVARRIA Y RAFAEL ZARDOYA

Función y selectividad

El estudio de la función de un canal de agua entraña varias dificultades. Al tratarse de una molécula neutra, su flujo constituye un proceso silente desde el punto de vista eléctrico. Ni puede medirse con las técnicas de electrofisiología clásicas en la investigación de canales iónicos, ni se dispone de inhibidores específicos. Para determinar la permeabilidad al agua de células animales suele medirse el cambio de volumen celular que se produce cuando las células pasan de un medio isosmótico a uno hipo o hiperosmótico. La elevada permeabilidad al agua de las membranas biológicas explica la celeridad extrema del flujo.

La identificación molecular de los canales de agua se inició mediante la extracción del ARN mensajero de tejidos con alta permeabilidad al agua (el riñón, por ejemplo) y la inyección del mismo en ovocitos de *Xenopus laevis*. Se venía recurriendo a los ovocitos de la rana para estudiar la expresión de numerosas proteínas. En el caso de los canales de agua, ofrecían claras ventajas: eran células grandes, con un volumen fácil de medir y una baja permeabilidad intrínseca al agua que

facilitaba la determinación de los cambios de permeabilidad inducidos por la expresión de proteínas exógenas. Hoy la técnica se emplea de forma rutinaria en la caracterización funcional de todas las acuaporinas clonadas para el estudio de las propiedades de permeabilidad al agua, selectividad a otros solutos, dependencia de la temperatura y del *p*H, amén de otros aspectos funcionales.

La AQP1 presenta una permeabilidad elevada. De las trece acuaporinas de mamífero que hoy conocemos, cuatro de ellas (AQP3, AQP7, AQP9 y AQP10) forman el subgrupo de las acuagliceroporinas, que son permeables también a la urea, el glicerol y a otros solutos de tamaño reducido. Excepto AQP6, tales acuaporinas se muestran impermeables a solutos dotados de carga eléctrica y iones.

La selectividad de las acuagliceroporinas no depende sólo de la estrechez del poro. En algunas, como AQP3, la permeabilidad al glicerol es mucho mayor que a la urea, una molécula de diámetro inferior. En AQP1, los aminoácidos dotados de carga eléctrica de los dos segmentos α-hélice que conforman el paso del canal se orientan con sus polos positivos hacia el centro del poro. Esto genera un importante campo electrostático positivo que repele protones y otros cationes, mientras que admite el paso de solutos neutros.

La obstrucción de AQP1 al paso de iones responde también al tamaño de los iones hidratados. En solución, los iones se encuentran rodeados de una capa de agua que aumenta su diámetro. En la acuaporina-1 no existe ninguna estructura que se encargue de liberar al ion de esta capa de solvatación; por tanto, es imposible que pase a través de su diámetro. La estrechez del poro y la notable hidrofobicidad de la superficie interna del canal explican la permeabilidad al agua de AQP1 y su selectividad.

ESTRUCTURA MOLECULAR DE LAS ACUAPORINAS

DOS TRIPLETES NPA

AQP1 se compone de dos grandes dominios, imagen especular uno del otro. Se organiza en seis segmentos de estructura α-hélice (*1-6*) que atraviesan la membrana de lado a lado; están unidos por cinco lazos conectores (*A-E*). El lazo intracelular *B* y el extracelular *E* son portadores de un triplete asparragina-prolina-alanina NPA. Esta duplicación del triplete NPA es característica de todas las acuaporinas.

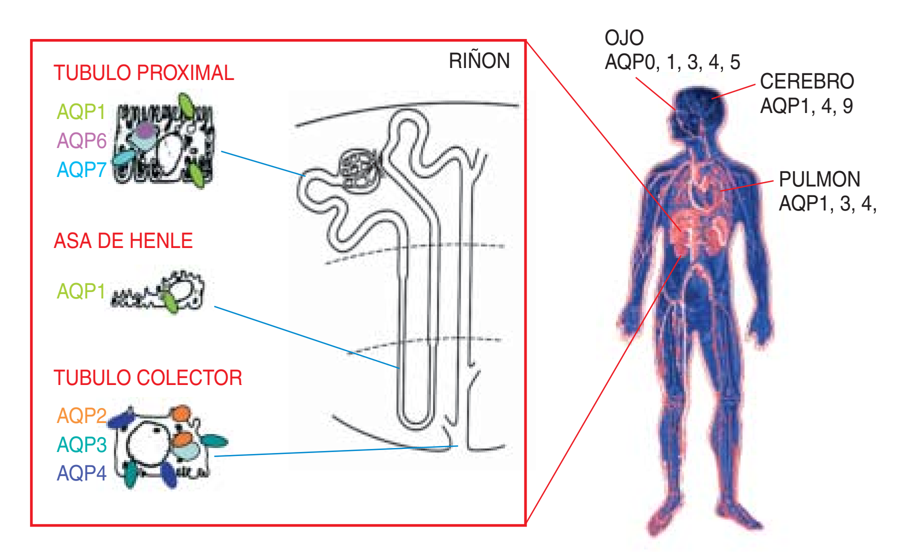
EL RELOJ DE ARENA

El lazo B y E se pliegan hacia la membrana para formar el poro o canal acuoso de la proteína. La estructura resultante encierra una zona central estrecha que se ensancha abriéndose hacia ambos lados de la membrana. Se denominó "reloj de arena", por su semejanza con éste. En el sitio más estrecho del poro acuoso se ponen en contacto los tripletes NPA.

DE CUATRO EN CUATRO

Aunque cada acuaporina forma por sí sola un canal, en la membrana celular estas proteínas se ensamblan en grupos de cuatro. Parece que un arreglo tetramérico confiere a la estructura una mayor estabilidad en el entorno lipídico de la membrana.

MIRIAM ECHEVARRIA Y RAFAEL ZARDOYA



4. LAS ACUAPORINAS SE HALLAN PRESENTES en la mayoría de las células de nuestro cuerpo. Las células principales del túbulo colector renal expresan AQP2, AQP3 y AQP4. Los astrocitos y células gliales de determinadas zonas cerebrales expresan sólo AQP4. Los órganos que, como el ojo, el riñón, el pulmón, el tracto gastrointestinal o las glándulas secretoras, se caracterizan por su alto trasiego de agua, presentan varias de estas proteínas. En el cerebro, donde escasea el flujo de agua a través de la membrana celular, hay una presencia y distribución limitadas de AQP.

MIRIAM ECHEVARRIA Y RAFAEL ZARDOYA

El transporte de agua paso a paso

Dentro del canal, las moléculas de agua tienden puentes de hidrógeno entre sí y con las paredes del canal. Sin embargo, a medida que una molécula de agua se acerca a la parte más estrecha del canal, proceda aquélla del interior o del exterior celulares, la intensa carga electrostática positiva de la zona, creada por los lazos que forman el poro, provoca una reorientación de la molécula que obliga a su átomo de oxígeno a tender puentes de hidrógeno con las dos asparraginas del poro. Primero la molécula de agua se une sólo a uno de esos aminoácidos, permaneciendo unida por el otro puente de hidrógeno a la molécula de agua vecina; luego se une a las dos asparraginas, rompiendo así por completo la molécula de agua su conexión con las otras moléculas de agua en el canal. La imposibilidad de tender puentes de hidrógeno con los aminoácidos hidrofóbicos que forman la pared del canal favorece la permeabilidad. Asimismo, en el sitio de mayor constricción del canal se rompe la concatenación de puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua que llenan el poro, lo que impide el transporte de protones que se establecería a través de AQP1. La acuaporina-1 es permeable al CO_2. De hecho, la proteína forma un canal para el transporte del dióxido de carbono.

Distribución

La mayoría de las células de nuestro cuerpo poseen acuaporinas. Las células principales del túbulo colector renal, por ejemplo, expresan AQP2, AQP3 y AQP4; los astrocitos y células gliales de determinadas zonas cerebrales, en cambio, expresan sólo AQP4; se han hallado indicios de la presencia de acuaporinas en las neuronas. Desconocemos la razón de tal diversidad.

En coherencia con su función de canal hídrico, el ojo, el riñón, el pulmón, el tracto gastrointestinal o las glándulas secretoras, órganos que se caracterizan por un alto trasiego de agua, presentan varias de estas proteínas. En el cerebro, en cambio, donde escasea el flujo de agua a través de la membrana celular (para minimizar las variaciones del medio extracelular que pudieran afectar a la función neuronal) hay una presencia y distribución limitadas de AQP.

Con excepción de AQP2 y AQP6, las acuaporinas intervienen en la composición de la membrana celular. Tras su síntesis, AQP2 permanece como una proteína de membrana en vesículas intracelulares; sólo bajo la acción de la hormona antidiurética (arginina-vasopresina), las vesículas se fusionan con la cara apical de las células principales del túbulo colector renal; de ese modo las células exponen en la membrana la proteína responsable del aumento de la permeabilidad al agua en dicho túbulo.

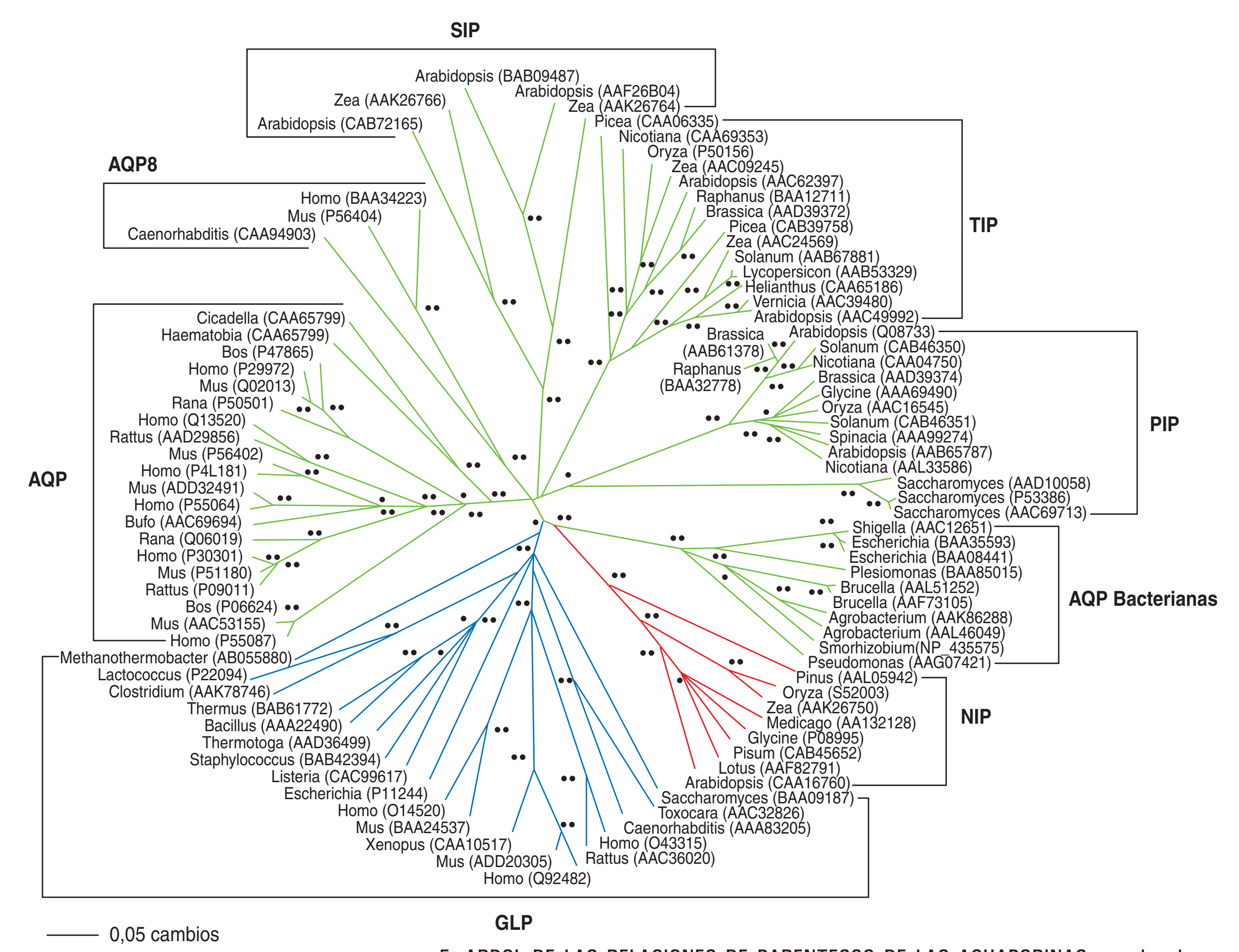
La acuaporina-6 es también una proteína intracelular. Se aloja en vesículas que permanecen siempre en el interior de la célula. En la cara apical de otros epitelios encontramos también AQP5. Las acuaporinas 3 y 4 son principalmente de membrana basolateral. AQP1 presenta una distribución ubicua en toda la membrana. AQP8 reside en vesículas intracelulares así como en la cara apical de las células acinares del páncreas. AQP9 parece preferir la parte basolateral de la membrana.

Regulación

Veamos cómo opera la regulación de la acuaporina-2 en el túbulo renal. La unión de la hormona vasopresina a receptores específicos provoca un aumento del AMP cíclico intracelular. Este mensajero molecular activa la proteína quinasa A (PKA), que se encarga de fosforilar a AQP2. La activación de AQP2 causa entonces la traslocación y fusión de vesículas que contienen AQP2: se funden con la cara apical de la célula renal.

También AQP1, en el hígado, AQP5, en las glándulas salivales, y AQP8, en el páncreas, se transportan desde vesículas intracelulares hasta la membrana celular. En estos casos, sin embargo, no se conoce el mecanismo de regulación. AQP6, presente en vesículas de las células intercaladas del túbulo colector renal, cambia su conformación a $pH < 5{,}5$: se hace permeable a agua y cloro. El pH regula también la actividad de AQP0 y AQP3. Algunas acuaporinas cuentan con secuencias conservadas para la fosforilación por interacción con proteínas quinasas A (AQP2, AQP5 y AQP9) o proteínas quinasas C (AQP4, AQP5 y AQP7). En algunos casos, la regulación se produce por fosforilación directa del canal. La fosforilación de la acuaporina-2 en la Ser-256 resulta fundamental para el incremento de permeabilidad al agua dependiente de vasopresina.

En fecha reciente se ha propuesto que la interacción directa entre las



5. ARBOL DE LAS RELACIONES DE PARENTESCO DE LAS ACUAPORINAS: canales de agua (*verde*), canales de glicerol y urea (*azul*) y nodulinas (*rojo*). Los puntos en las ramificaciones indican la significación estadística.

MIRIAM ECHEVARRIA Y RAFAEL ZARDOYA

acuaporinas y otras proteínas celulares constituiría un mecanismo de señalización. En el extremo C-terminal de la acuaporina-4 se han identificado secuencias de reconocimiento para el anclaje en proteínas del citoesqueleto que podrían determinar la distribución espacial de AQP4 en la membrana del astrocito. La regulación crónica se realiza por diversos mecanismos que alteran la transcripción de tales proteínas.

El número de moléculas de acuaporina-2 aumenta con la vasopresina. Tal regulación se debe a la presencia, en el promotor del gen de AQP2, de regiones que unen AMP cíclico y, por tanto, activan la transcripción del gen. La deshidratación provoca el aumento de AQP3 en el riñón, la vejiga urinaria y los uréteres. Un estrés hiperosmótico estimula la expresión de AQP4 y AQP9 en la corteza cerebral.

Patologías

Numerosos trastornos se han asociado con una distribución aberrante de las acuaporinas en un órgano determinado. También la alteración en la función o regulación de estas proteínas puede resultar patológica. Determinadas mutaciones en el gen de AQP2 se han relacionado con nefropatías. En el laboratorio de Alan Verkman se obtuvieron ratones “knockout” en los que se había silenciado la expresión de cada una de las acuaporinas. Los múridos transgénicos se utilizaron para el estudio de las alteraciones funcionales que acarrea la ausencia de una de estas proteínas. Se observó que dos mutaciones génicas de AQP0 provocan en ratones cataratas congénitas.

Debido a su ubicuidad, la acuaporina-1 se halla implicada en numerosos trastornos. La presencia de AQP1 en el endotelio de la córnea y de AQP5 en el cristalino sugiere una función de estas proteínas en el mantenimiento de la transparencia de la córnea y el cristalino, respectivamente. AQP1 es responsable de la reabsorción de casi el 80 por ciento del agua en el túbulo renal. Así, los ratones en los que se ha eliminado esta proteína son incapaces de producir orina concentrada. En el cerebro, AQP1 participa en la producción del líquido cefalorraquídeo. En el pulmón, la expresión de AQP1 aumenta al nacer y en presencia de corticosteroides; ello sugiere que la proteína interviene en el aclaramiento del agua pulmonar que requiere el recién nacido para iniciar la respiración.

La disfunción de las cuatro acuaporinas que se expresan en el tracto respiratorio (AQP1, AQP3, AQP4 y AQP5) podría guardar relación con el asma, edemas pulmonares u otras patologías asociadas a la homeostasis del agua pulmonar.

La disfunción de la acuaporina-2 provoca trastornos graves. En 1994, el equipo que dirige Peter Deen, de la Universidad y el Hospital Univer-

sitario de Nimega, publicó el primer caso de diabetes insípida nefrogénica (NDI) hereditaria asociada a mutaciones del gen de AQP2. Los individuos que sufren esta enfermedad eliminan grandes cantidades de orina diluida debido a una insuficiencia renal que impide la reabsorción de agua en respuesta a la vasopresina. Un aumento en la expresión de AQP2 se relaciona con un incremento en la retención de líquido: así ocurre en la cirrosis hepática, la insuficiencia cardíaca congestiva y el embarazo.

Las alteraciones en la expresión de las acuaporinas provocan también trastornos cerebrales. Las AQP4 aberrantes se asocian al desarrollo de patologías relacionadas con desequilibrios en la homeostasis iónica. Una disfunción de la acuaporina-4 podría provocar cambios en la concentración de iones potasio (K^+) que lleven a un aumento de la excitabilidad neuronal. La relación entre la AQP4 y el edema cerebral se descubrió mediante experimentos llevados a cabo con ratones en los que la expresión de AQP4 se había silenciado. Se ha observado también que el edema que se produce tras un período isquémico puede reducirse de forma notable mediante la eliminación de la AQP4 perivascular.

Evolución por duplicación génica

Como hemos mencionado, las acuaporinas pertenecen a la familia de proteínas integrales de membrana (PIM). Esta familia agrupa a más de 200 miembros. Su evolución arranca de la duplicación de un gen originario, que supuso la aparición de dos proteínas con funciones diferenciadas: los canales de agua y los canales de glicerol y urea. Esta es la situación que se observa hoy en bacterias y hongos, que cuentan sólo con una copia de cada uno de estos canales. Luego, ambos tipos de canales se diversificaron mediante duplicaciones génicas en animales y plantas. En *Arabidopsis* se han identificado hasta 35 proteínas; ello resalta la importancia del control del flujo de agua en las plantas.

Las proteínas transportadoras de glicerol han experimentado numerosas duplicaciones en el nemátodo *Caenorhabditis elegans*. En mamíferos, tres duplicaciones han dado lugar, de forma sucesiva, a AQP3, AQP7, AQP9 y AQP10. Curiosamente, no hay miembros de esta subfamilia en plantas.

En vertebrados encontramos seis canales de agua resultantes de duplicaciones génicas consecutivas: AQP0, AQP1, AQP2, AQP4, AQP5 y AQP6. El número de acuaporinas se desconoce en invertebrados; hasta la fecha, se ha descrito sólo una AQP en tres especies de insectos. La acuaporina-8 se encuentra en todos los animales.

El mayor número de acuaporinas se encuentra en el reino vegetal. La caracterización de los canales de agua en plantas se debe sobre todo a dos grupos de investigación, el de Maarten J. Chrispeels, de la Universidad de San Diego en California, y el de Per Kjellbom, de la Universidad de Lund. La primera acuaporina que se aisló en plantas se denominó ALFA-TIP.

De acuerdo con su origen evolutivo, se conocen cuatro grandes grupos de canales de agua en plantas. Cada grupo presenta una localización celular diferencial: las proteínas intrínsecas de membrana plasmática (PIP), las proteínas intrínsecas del tonoplasto o membrana vacuolar (TIP), las pequeñas proteínas básicas intrínsecas (SIP) y las nodulinas (NIP). Las proteínas intrínsecas de membrana plasmática parecen derivar de una única duplicación génica que dio lugar a dos tipos básicos de PIP: el tipo 1 y el tipo 2. Las proteínas intrínsecas del tonoplasto resultan de al menos dos duplicaciones génicas sucesivas.

De todas las acuaporinas vegetales, las que revisten mayor interés desde el punto de vista evolutivo son las nodulinas. Se describieron en los nódulos simbióticos de las raíces de leguminosas, pero se encuentran también en plantas sin nódulos simbióticos. Según los análisis de parentesco, todas las nodulinas descenderían de un mismo tipo de canales de agua que fue adquirido por el ancestro común de todas las plantas a partir de bacterias por transferencia génica horizontal. Luego, puesto que las plantas carecen de transportadores de glicerol-urea, estos canales de agua habrían cambiado su función: una fuerte presión selectiva los transformó en los actuales canales de glicerol-urea.

Dado que las nodulinas adquirieron su capacidad de transportar glicerol-urea de forma distinta al resto de acuagliceroporinas (mediante convergencia funcional), los aminoácidos implicados en la selectividad por glicerol-urea son también distintos. La secuencia de las nodulinas guarda semejanza con la secuencia típica de los canales de agua, pero presenta algunos cambios, necesarios para su función, que recuerdan a las acuagliceroporinas.

MIRIAM ECHEVARRIA Y RAFAEL ZARDOYA

Los autores

Miriam Echevarría Irusta se doctoró en biología por la Universidad Simón Bolívar de Caracas. Es profesora de la Universidad de Sevilla. Se dedica al estudio funcional de las acuaporinas en el departamento de fisiología médica y biofísica del Laboratorio de Investigaciones Biomédicas del Hospital Virgen del Rocío. **Rafael Zardoya San Sebastián** se doctoró en biología por la Universidad Complutense de Madrid. Desarrolla su investigación sobre filogenia y evolución molecular en el Museo Nacional de Ciencias Naturales del CSIC.

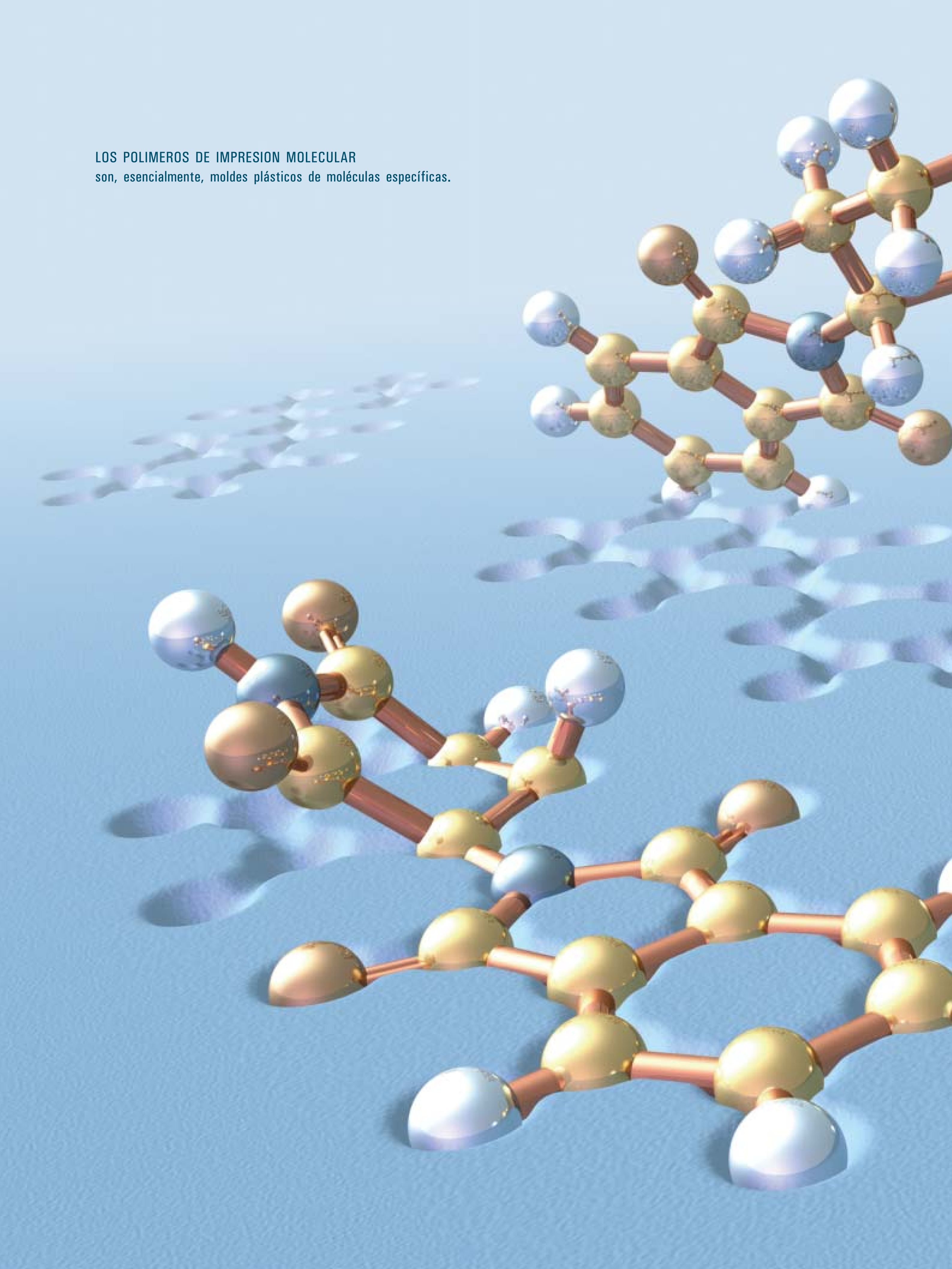
Bibliografía complementaria

APPEARANCE OF WATER CHANNELS IN *XENOPUS* OOCYTES EXPRESSING RED CELL CHIP28 PROTEIN. G. M. Preston y otros en *Science*, vol. 256, págs. 385-387, 1992.

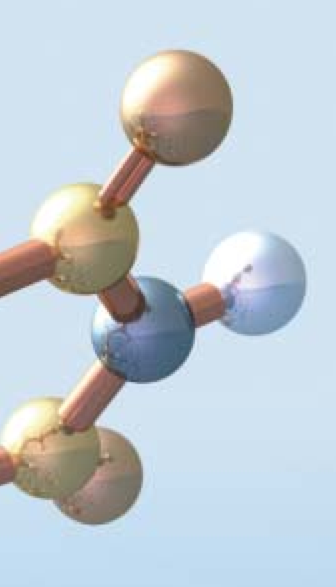
CLONING AND EXPRESSION OF AQP3, A WATER CHANNEL FROM THE MEDULLARY COLLECTING DUCT OF RAT KIDNEY. M. Echevarría y otros en *Proceeding of National Academy of Sciences USA*. vol. 91, págs. 10997-11001, 1994.

STRUCTURAL DETERMINANTS OF WATER PERMEATION THROUGH AQUAPORIN-1. K. Murata y otros en *Nature*. vol. 407, págs. 599-605, 2000.

ORIGIN OF PLANT GLYCEROL TRANSPORTERS BY HORIZONTAL GENE TRANSFER AND FUNCTIONAL RECRUITMENT. R. Zardoya y otros en *Proceeding National Academy of Sciences USA.* vol. 99, págs. 14893-14896, 2002.



LOS POLIMEROS DE IMPRESION MOLECULAR
son, esencialmente, moldes plásticos de moléculas específicas.



Perspectivas del MOLDEADO MOLECULAR

Los moldes plásticos a escala molecular y los que imitan moléculas biológicas se encuentran ya en condiciones de acelerar el descubrimiento de fármacos, la prevención de ataques bioterroristas y la eliminación de toxinas del medio, entre otras aplicaciones

Klaus Mosbach

Hace más de tres décadas que mis alumnos de la Universidad de Lund y yo, junto a otros grupos, desarrollamos un tipo de "redes de pesca" que funcionaban a escala nanométrica (millonésima de milímetro). Las redes que creamos estaban capacitadas para atrapar células vivas e, incluso, entidades biológicas más pequeñas como enzimas y otras moléculas. En condiciones adecuadas, estas "capturas" podían continuar realizando sus funciones habituales fuera de organismos vivos durante meses.

La técnica resultó atractiva en decenas de aplicaciones. Por ejemplo, para producir ácido aspártico, un aminoácido utilizado en la preparación de diversas medicinas, se usan hoy redes plásticas que contienen células de *Escherichia coli*. En la industria alimentaria, la conversión del azúcar glucosa en fructosa, mucho más dulce, se realiza mediante una enzima específica insertada en un material plástico. Una combinación red-enzima diferente ha permitido, incluso, la fabricación de los precursores del material plástico del que están hechas las redes. Y, para nuestra satisfacción, continúan apareciendo campos de aplicación potenciales para estas trampas, incluido el médico. De forma notable, las células soportadas sobre redes podían reemplazar aquellas que habían muerto o funcionaban de manera incorrecta, como las células que producen insulina y que los diabéticos necesitan.

Pero la herramienta original de la red representa sólo un primer intento de desarrollar técnicas que sumen las ventajas de plásticos y moléculas. Superan el medio millar los investigadores que, en diversas partes del mundo, ensayan las aplicaciones de una segunda técnica, la del moldeado molecular, en cuyo desarrollo desempeñé un papel crucial. Mi grupo ideó una versión, hoy popular, utilizando los principios de la bioquímica. Otros investigadores —entre los que destaca Günter Wulff, de la Universidad Heinrich Heine en Düsseldorf, y Kenneth J. Shea, de la Universidad de California en Irvine— desarrollaron métodos similares basados en principios de la química orgánica.

De forma general, las partículas plásticas u otras estructuras se cubren con impresiones de moléculas específicas y dichas impresiones —en realidad, moldes de las moléculas— se usan para propósitos concretos. Una vez perfeccionada, esta técnica podía tener aplicación en muchas áreas, incluido el sector alimentario, que ve el beneficio de su capacidad para eliminar contaminantes, como

KEN EWARD *BioGrafx*

el veneno aflatoxina producido por un hongo. Las nuevas herramientas han comenzado también a despertar gran interés en el campo biomédico, ya que podrían acelerar las etapas iniciales del descubrimiento de medicamentos (abaratando costes), ser utilizadas en la separación y purificación de fármacos y contribuir al desarrollo de dispositivos médicos y herramientas de diagnóstico.

Investigación "cortina de humo"

Ya que en mi laboratorio en Lund se estudiaban métodos para inmovilizar enzimas y células, empecé a preguntarme qué ocurriría si modificábamos nuestra técnica "de pesca" original, de modo que la red se moldeara alrededor de las moléculas capturadas y nos permitiera posteriormente eliminar las moléculas capturadas mediante un "lavado", dejando cavidades permanentes o moldes de ellas mismas. ¿Dejarían estas impresiones que otras moléculas del mismo tipo que las originales encajaran en esos huecos? Me di cuenta de que, si así era, los moldes podrían ser útiles para distintas tareas; una de ellas, el aislamiento de moléculas seleccionadas a partir de mezclas de compuestos (pues sólo las moléculas que poseen la forma y los grupos químicos correctos encajarían cómodamente en las cavidades).

A lo largo de más de veinte años, mi equipo llevó a cabo de forma intermitente una serie de experimentos con objeto de desarrollar esta segunda técnica. Realizamos lo que yo denomino "investigación cortina de humo", ya que tuvimos que demostrar el principio, más allá de la idea, por nuestros propios medios, sin financiación oficial. En ese tiempo supe, extraoficialmente, que los inversores potenciales consideraban que mi idea parecía muy lejana para ser materializada, que sonaba como algo mágico.

Durante décadas resolvimos la manera de fabricar moldes plásticos de las moléculas y la financiación externa comenzó a llegar. Conseguimos también que el procedimiento resultara sencillo; se necesitan sólo unos pocos días para hacer partículas poliméricas o películas finas que contienen cientos de miles de estos moldes. En primer lugar, un técnico mezcla las moléculas de interés —lo que denominamos plantillas— con los bloques de construcción de los plásticos. Estas unidades, también llamadas monómeros, crean una malla plástica alrededor de cada plantilla. A continuación, se extraen las plantillas con ayuda de un disolvente, obteniéndose un material salpicado de cavidades revestidas de plástico que poseen una "memoria" de los contornos y distribuciones de carga de los grupos químicos de la molécula biológica original.

Los moldes plásticos, llamados polímeros de impresión molecular —o, como yo los apodé, MIP (en inglés, *molecularly imprinted polymers*)—, poseen diversas características que los hacen atractivos. Resultan económicos, ya que se requiere relativamente poco tiempo para producirlos y los monómeros plásticos son baratos. Además, pueden ser estables durante mucho tiempo, incluso en condiciones extremas. Algunas de las preparaciones de nuestro laboratorio han continuado siendo eficaces después de un año.

Una de las muchas utilidades potenciales de los MIP es la eliminación de la sangre de sustancias indeseadas. De este modo, se podrían disponer los moldes moleculares de las sustancias en cuestión contenidos en partículas poliméricas empaquetadas en tubos. Por ejemplo, un paciente con los riñones dañados podría utilizar un tubo colocado en un dispositivo fuera de su cuerpo (o múltiples tubos unidos en serie) para eliminar una sustancia dañina de su torrente sanguíneo. A medida que la sangre del paciente pasara a través de una vía intravenosa dispuesta entre una vena y el tubo exterior con los MIP, las partículas poliméricas atraparían la sustancia seleccionada y el suero limpio entraría de nuevo en el torrente circulatorio. Este tipo de tratamiento, utilizado en continuo, podría (en teoría) reducir la frecuencia de empleo de la hemodiálisis. Una vez que el MIP se hubiera saturado con la sustancia no deseada, podría desecharse, reemplazado por otro nuevo.

Andando el tiempo, podrían también diseñarse dispositivos impresos para eliminar sustancias no deseadas de otras partes del cuerpo, como el tracto gastrointestinal. Por ejemplo, los moldes de moléculas de colesterol pueden extraer colesterol a partir de disoluciones.

La selectividad de los MIP podría ser aprovechada por la industria farmacéutica para la obtención de fármacos de mayor pureza. La pureza puede resultar especialmente importante cuando un fármaco se presenta en dos formas, imágenes especulares una de la otra, una de las cuales es beneficiosa y la otra potencialmente nociva. La talidomida es el ejemplo clásico. A finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, antes de que alguien se percatara de que la forma útil tenía una imagen especular perjudicial, en docenas de países se prescribieron a numerosas mujeres, por diversas razones, fórmulas que contenían ambas formas. Trágicamente, la forma "mala" de la molécula produjo graves malformaciones en alrededor de 10.000 bebés nacidos de mujeres que tomaron el medicamento durante el embarazo.

Los fabricantes de medicamentos a menudo sintetizan por separado las dos imágenes especulares (o "derecha" e "izquierda") de una molécula, pero los métodos de producción pueden dar lugar a la formación de pequeñas cantidades de la forma molecular no deseada. Comparadas con las técnicas comerciales habituales, las que se basan en los MIP podrían resultar más eficaces a la hora de eliminar la versión no deseada de un fármaco, ya que cada forma encajaría perfectamente sólo en una de las correspondientes cavidades.

Resumen/Aplicaciones nanoplásticas

- Los moldes plásticos de moléculas específicas —polímeros de impresión molecular (MIP)— capturarán esas moléculas y sólo esas moléculas. Puede recurrirse a los MIP para separar sustancias deseadas de una mezcla impura o para detectar organismos patógenos o toxinas presentes en el ambiente o en muestras de sangre.
- Se están creando empresas para comercializar la técnica.
- También está en desarrollo una nueva generación de variantes de la técnica, conocidas como doble moldeado y moldeado directo.

Dada la capacidad de detección de los MIP, algunas empresas y entidades gubernamentales preocupadas por el terrorismo y las enfermedades emergentes los están considerando como componentes en sensores para la eliminación de toxinas y organismos patógenos. Sin embargo, los sensores que se pueden equipar hoy día con las moléculas biológicas que favorecen la eliminación a veces no son lo suficientemente resistentes como para sobrevivir en ambientes más exigentes que los limitados a un laboratorio.

Entre las sustancias potencialmente nocivas que han sido detectadas por los MIP en nuestros ensayos se encuentra el herbicida atrazina. Las cavidades plásticas han identificado sarín, un gas nervioso que puede servir de arma bioterrorista. (El lanzamiento de sarín con este propósito llegó a ser muy conocido cuando una secta religiosa liberó la toxina en Japón, en dos ocasiones, a mediados de los noventa. El gas afectó a miles de personas, matando a 19 de ellas.) Los MIP podrían aplicarse, además, a la detección de esporas de ántrax, el famoso agente que fue introducido en sobres y enviado a personal de los medios de comunicación y funcionarios del gobierno de los Estados Unidos en el otoño de 2001.

Aún más tentador, un único sensor equipado con múltiples tipos de MIP podría identificar distintos compuestos a la vez en una única muestra. Tal sensor multifuncional podría ser fabricado sobre un dispositivo electrónico tipo *chip* de manera que, al detectar una de las sustancias diana, enviaría un "aviso" de su presencia a un receptor. Así, diferentes recipientes con un gran número de MIP podrían eliminar las sustancias no deseadas. Tanto el gobierno como la industria han mostrado un gran interés en unidades enmarcadas en esta línea para la limpieza ambiental de lagos, arroyos y suelos.

La forma equivale a la función

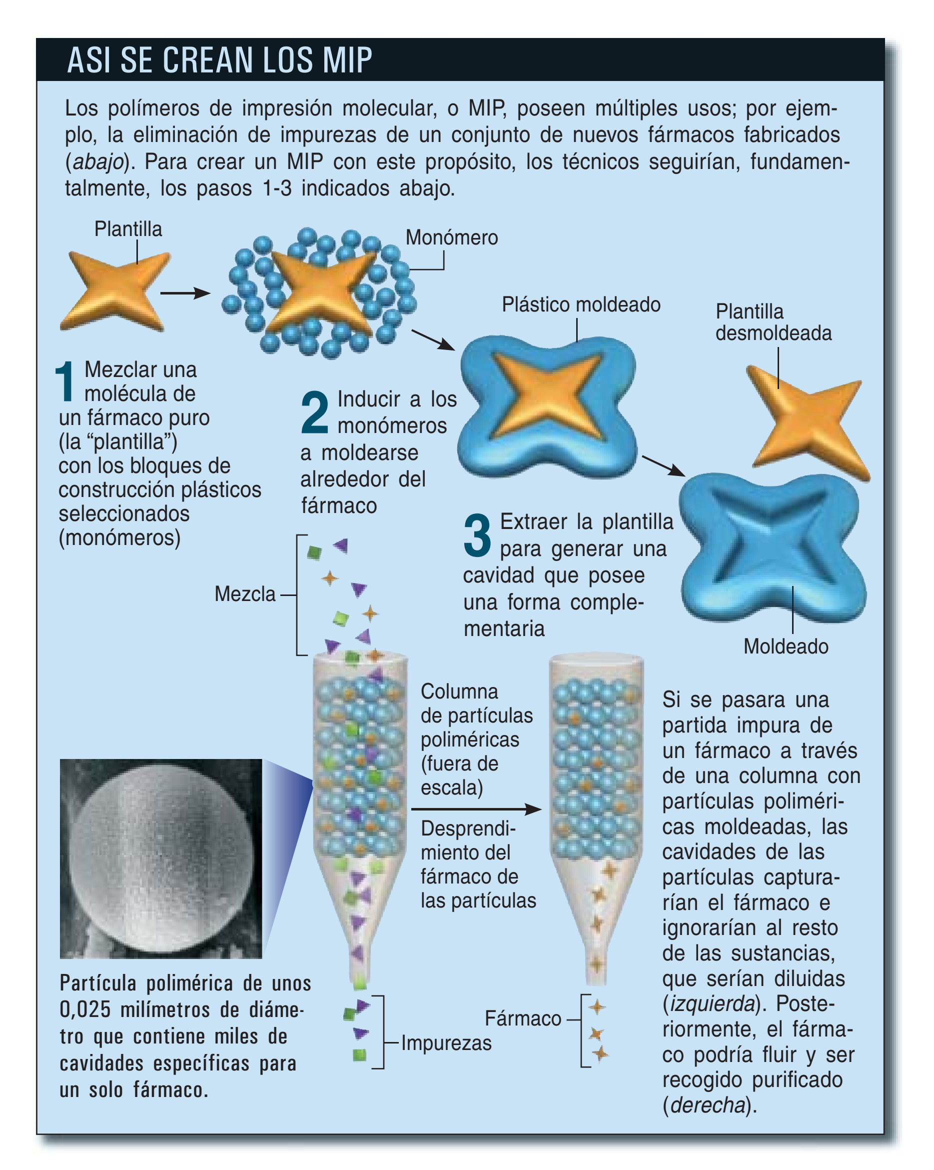
Mientras que muchas aplicaciones de los MIP se basan en su habilidad para capturar las moléculas o microorganismos que se ajusten a una plantilla concreta, otras aplicaciones implican el moldeado plástico que imita la totalidad o una parte de una molécula natural como, por ejemplo, un anticuerpo. Nuestro organismo produce de forma natural anticuerpos cuando el sistema inmunitario distingue componentes específicos, o antígenos, de sustancias extrañas, como virus o bacterias que se han introducido en un organismo vivo que sirve de anfitrión. Los anticuerpos poseen una gran especificidad; cada tipo se une fuertemente a una molécula en particular ignorando a las demás, como una llave al encajar en una cerradura. Por esa razón, quienes se dedican a desarrollar pruebas de diagnóstico los han explotado ampliamente. Por ejemplo, en contacto con una muestra de sangre, ciertos anticuerpos se unen a una bacteria concreta si está presente, indicando que la persona está infectada. Otros anticuerpos podrían revelar la concentración de diversas proteínas en la sangre.

Los fabricantes de herramientas de diagnóstico generan cantidades de anticuerpos mediante la inyección de proteínas foráneas u otros compuestos en cabras u otros animales. Los técnicos extraen a continuación la sangre de los animales, obteniendo los anticuerpos generados. Sin embargo, pueden también fabricarse imitadores de anticuerpos duraderos mediante moldeado o impresión plástica con un antígeno específico; los MIP resultantes poseen, esencialmente, el mismo centro de enlace para el antígeno que tiene el correspondiente anticuerpo.

Tales "plasticuerpos", como se les denomina en mi laboratorio, podrían en potencia reemplazar a los anticuerpos naturales en muchas pruebas, con la consiguiente reducción del empleo de animales. (A propósito, el desarrollo de los plasticuerpos, por

ASI SE CREAN LOS MIP

Los polímeros de impresión molecular, o MIP, poseen múltiples usos; por ejemplo, la eliminación de impurezas de un conjunto de nuevos fármacos fabricados (*abajo*). Para crear un MIP con este propósito, los técnicos seguirían, fundamentalmente, los pasos 1-3 indicados abajo.



Partícula polimérica de unos 0,025 milímetros de diámetro que contiene miles de cavidades específicas para un solo fármaco.

Si se pasara una partida impura de un fármaco a través de una columna con partículas poliméricas moldeadas, las cavidades de las partículas capturarían el fármaco e ignorarían al resto de las sustancias, que serían diluidas (*izquierda*). Posteriormente, el fármaco podría fluir y ser recogido purificado (*derecha*).

GEORGE RETSECK; CORTESIA DE KLAUS MOSBACH Y ANDREW MAYES (*micrografía*)

el cual recibí el Premio Nórdico para Alternativas a Experimentos Animales, fue la única parte de mi trabajo científico que comprendió totalmente y aplaudió una de mis hijas cuando era una adolescente.)

Los MIP podrían servir también como sustitutos de larga duración de las enzimas en la industria. En la naturaleza, cada organismo produce miles de enzimas, cada una de las cuales cataliza una reacción bioquímica específica, como la rotura de una molécula concreta en un lugar determinado o la unión de dos sustancias. En condiciones normales, la reacción tiene lugar cuando la diana de una enzima, denominada sustrato, se acomoda en el centro activo de la enzima, una cavidad.

Para fabricar enzimas artificiales, o "plastizimas", mi laboratorio y otros grupos se aprestan a crear cavidades plásticas que son moldes de determinadas conformaciones de los sustratos y que imitan así la forma tridimensional del centro activo de una enzima real. Los monómeros con los que contamos, y las plastizimas resultantes, disponen de grupos químicos similares a los que se encuentran en las enzimas naturales. Los primeros resultados en estas líneas han dado lugar a cierta actividad enzimática, pero aún tenemos que lograr que los MIP actúen con mayor efectividad. Las plastizimas podrían llevar a cabo razonablemente acciones que no han sido aún descubiertas para ninguna enzima natural, como la desintoxicación por ciertas sustancias mediante su rotura.

La próxima generación

Mi laboratorio se dedica ahora a dos objetivos dentro de la técnica MIP. Uno de ellos pretende conducir a una imitación de una molécula original. Más exactamente, genera una sustancia que tiene la misma forma tridimensional y habilidades funcionales que la original; la funcionalidad procede de la forma, que se ajusta perfectamente, y de la distribución de cargas en posiciones definidas. Esta técnica de doble moldeado, así la llamamos, implica crear una nueva molécula a partir de un molde; básicamente, un molde de un molde.

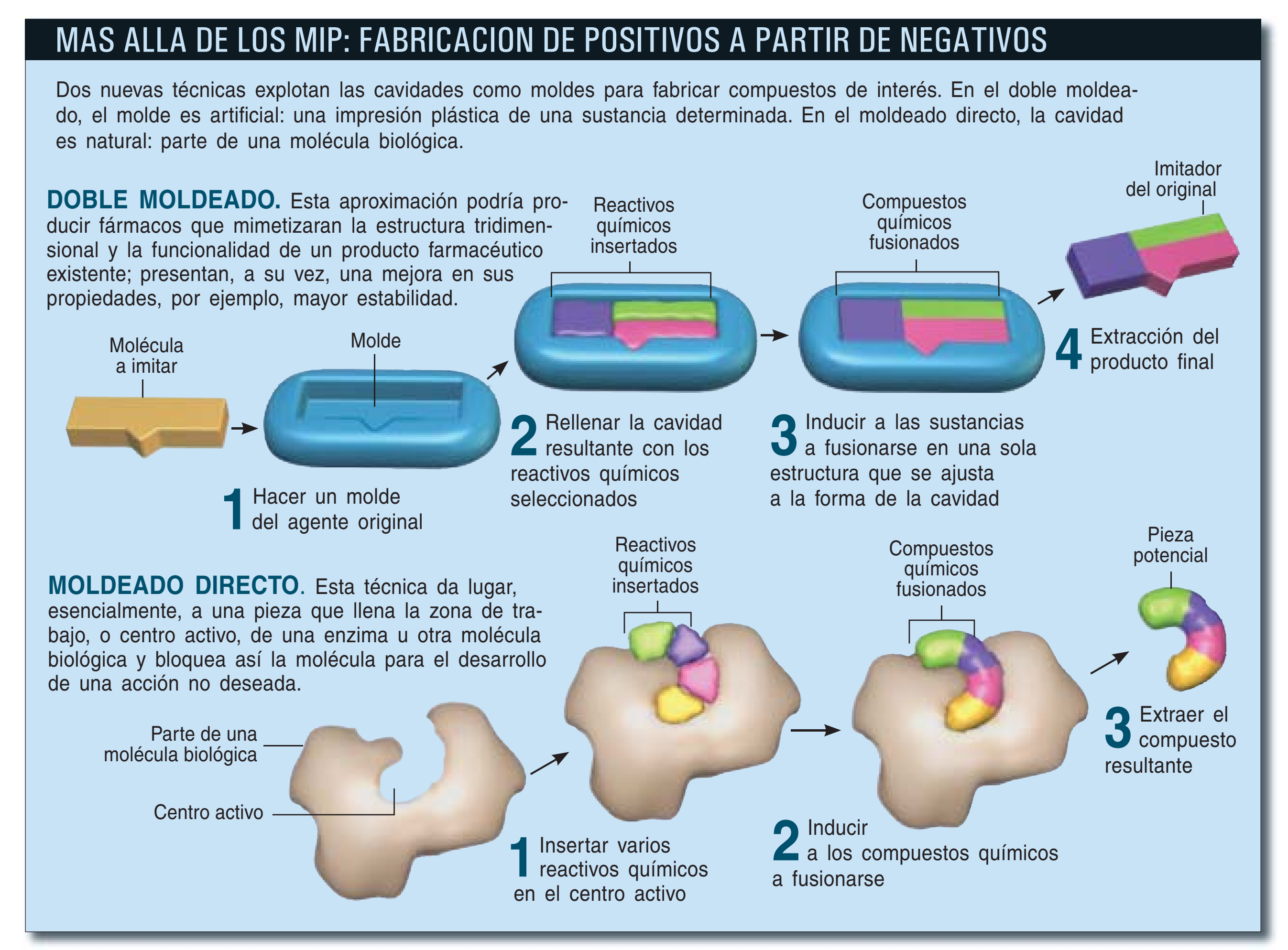
Después de realizar la primera impresión, utilizamos la cavidad resultante como un molde minúsculo, o nanorrecipiente, y colocamos fragmentos de moléculas o precursores de polímeros plásticos en dicho nanorrecipiente. A continuación, dejamos que los componentes se combinen en una única estructura que se ajusta a la forma de la cavidad.

Se trata de una estrategia que podría ayudar a los laboratorios farmacéuticos que sintetizan medicamentos parecidos a los ya existentes. Dichas empresas preparan esos derivados para mejorar los originales o para producir compuestos que respondan al mismo objetivo que los patentados por sus competidores.

Pero el método habitual hoy día requiere el desarrollo de una biblioteca combinatoria, que consta de miles de compuestos relacionados. De cada uno se somete a prueba su capacidad

MAS ALLA DE LOS MIP: FABRICACION DE POSITIVOS A PARTIR DE NEGATIVOS

Dos nuevas técnicas explotan las cavidades como moldes para fabricar compuestos de interés. En el doble moldeado, el molde es artificial: una impresión plástica de una sustancia determinada. En el moldeado directo, la cavidad es natural: parte de una molécula biológica.



para unirse a una molécula biológica dada (que podría ser reemplazada por un análogo MIP más estable). Se vuelven a contrastar las sustancias que se enlazan. El doble moldeado resulta un proceso más circunscrito. Mezclamos y emparejamos materiales colocados en un nanorrecipiente creado por impresión o moldeado, observando qué combinaciones poseen propiedades prometedoras. Nuestro procedimiento, comparado con el de las bibliotecas combinatorias, podría limitar drásticamente el número de etapas que se necesitan para encontrar candidatos adecuados para las pruebas de seguimiento.

Moldeado directo

La otra técnica, que denominamos moldeado directo, se está utilizando por unos pocos grupos de investigación. Emplea una molécula biológica (a menudo una enzima o la parte de la misma que contiene el centro activo) a modo de nanorrecipiente para descubrir un fármaco nuevo; una aproximación que podría acelerar el descubrimiento de agentes inhibidores de determinadas enzimas. Aproximadamente un tercio de los medicamentos comercializados son inhibidores de enzimas. Sería de gran valor disponer de métodos más eficaces para el descubrimiento de otros miembros de esta categoría.

Supongamos que un laboratorio farmacéutico quisiera desactivar una enzima catalizadora de las interacciones implicadas en el crecimiento metastático de tumores. Una buena solución sería sintetizar una molécula que bloqueara el centro activo de la enzima, evitando la interacción entre el centro y su sustrato habitual. Los investigadores podrían ensayar a ciegas todo tipo de compuestos, esperando encontrar una buena diana. O podrían insertar monómeros y otros compuestos químicos pequeños en el centro activo, como se hace en el método de doble moldeado. De esa forma podría probarse si la combinación que diera lugar a una unidad que encajara firmemente inhibía la enzima en una célula viva.

Como sucede con todas las nuevas técnicas y aplicaciones específicas, han de abordarse algunos problemas de fabricación relacionados con los MIP. Necesitamos resolver cómo escalar las cantidades de los moldes que podemos hacer. Debemos asegurarnos de que cada copia de un molde es siempre la misma que las demás. Y queremos desarrollar formas eficientes de extraer las plantillas una vez terminado el molde molecular.

Mientras los que trabajamos en este floreciente campo solucionamos los obstáculos que quedan para mejorar los MIP, nos estimula el creciente interés demostrado por las industrias farmacéuticas y biotecnológicas. Continuamente me sorprende el hecho de que hoy se puedan fabricar en el plazo de días algunas formas moleculares que a la naturaleza le ha llevado millones de años desarrollar. Estoy deseando que llegue el día en que tamaña facultad se generalice para acelerar el descubrimiento de fármacos y sirva de apoyo a otras aplicaciones.

Algunas empresas que utilizan los MIP

EMPRESA	MUESTRA DE ACTIVIDADES
Aspira Biosystems Burlingame, California	Emplea como plantilla un segmento seleccionado de una proteína mediante una técnica denominada impresión molecular parcial; espera aplicar la aproximación en investigación y terapia médica
MIP-Globe Zúrich, Suiza	Trabaja en la mayoría de aspectos del moldeado molecular, incluyendo aplicaciones relacionadas con el descubrimiento de fármacos
MIP*Solutions* Las Vegas, Nevada	Desarrolla técnica para contribuir al suministro de agua potable segura eliminando contaminantes y para usar en el tratamiento de aguas residuales y operaciones de explotación minera basadas en agua
MIP Technologies Lund, Suecia	Diseña herramientas para la extracción y separación de sustancias a partir de mezclas complejas a escala analítica e industrial; la técnica está pensada para las industrias farmacéutica, química, alimentaria y otras
POLYIntell Ruán, Francia	Diseña polímeros para su uso en purificación y detección; genera anticuerpos y enzimas artificiales a petición, para su uso en la industria farmacéutica y otras industrias
Semorex North Brunswick, New Jersey, y Ness Ziona, Israel	Desarrolla dispositivos manuales para ayudar a los médicos a diagnosticar enfermedades infecciosas y tumores en fase precoz o que permitan a militares y personal de seguridad y urgencias detectar e identificar rápidamente explosivos y armas químicas en el campo

El autor

Klaus Mosbach es profesor y fundador del Centro de Moldeado Molecular del departamento de bioquímica pura y aplicada de la Universidad de Lund en Suecia. Fue también cofundador del departamento de biotecnología del Instituto Federal Politécnico de Zúrich. Consumado pianista, obtiene su inspiración científica interpretando música.

Bibliografía complementaria

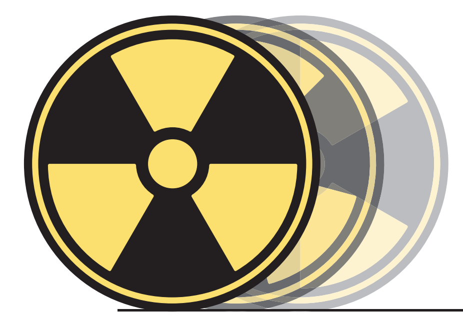
THE EMERGING TECHNIQUE OF MOLECULAR IMPRINTING AND ITS FUTURE IMPACT ON BIOTECHNOLOGY. Klaus Mosbach y Olof Ramström en *Bio/Technology*, vol. 14, págs. 163-170, febrero de 1996.

FORMATION OF A CLASS OF ENZYME INHIBITORS (DRUGS) INCLUDING A CHIRAL COMPOUND BY USING IMPRINTED POLYMERS OR BIOMOLECULES AS MOLECULAR-SCALE REACTION VESSELS. Yihua Yu, Lei Ye, Karsten Haupt y Klaus Mosbach en *Angewandte Chemie: International Edition*, vol. 41, págs. 4459-4463; 2002.

TWO WAYS TO SHAPE NEW DRUGS. Stu Borman en *Chemical and Engineering News*, vol. 81, n.º 2, pág. 40; 2003.

MOLECULARLY IMPRINTED MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. Dirigido por Mingdi Yan y Oolof Ramström. CRC Press, 2004.

¿Existe un futuro para la energía nuclear?



La viabilidad de la energía nuclear dependerá de un cambio en las premisas energéticas actuales que incorpore criterios éticos en un mundo globalmente amenazado por el cambio climático

José Antonio Tagle González

El futuro de la energía nuclear, tanto la basada en la fisión de núcleos pesados como la que podría generarse en el futuro a partir de la fusión de núcleos ligeros, dependerá de las condiciones en que se encaren las necesidades energéticas. En los decenios venideros, la energía eléctrica tendrá un peso decisivo en el crecimiento económico y se multiplicará su demanda. Pero la conformación energética que en concreto tome la sociedad vendrá determinada por premisas que guíen su desarrollo y la financiación de su energía. Aunque las técnicas nucleares constituyen una opción válida y solvente, sólo un cambio radical en las premisas energéticas actuales podría asegurar su permanencia y expansión.

La política energética se enfrenta a una serie de problemas cruciales: la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente el CO_2, los costes de los combustibles, con una alta volatilidad de los precios del petróleo y el gas, el desequilibrio regional en la dependencia o autoabastecimiento energéticos, las dificultades en el acceso a los recursos, o las fuertes inversiones necesarias para el desarrollo de técnicas más eficientes y menos contaminantes.

Asimismo, el desarrollo energético actual y futuro está condicionado por una serie de factores que posibilitarán el progreso de las técnicas nucleares. En primer lugar, la energía eléctrica será un factor crítico para el crecimiento económico de la sociedad. Hasta finales del siglo pasado el acceso a las fuentes primarias de energía fue un factor determinante para el desarrollo. En adelante, el impacto que la energía eléctrica y técnicas asociadas tienen en cualquier actividad de las sociedades modernas vincula el futuro desarrollo social con la explotación de las formas avanzadas de generar energía eléctrica (*figura 2*).

El suministro energético debe enfrentarse también al problema de la superpoblación urbana. Hoy en día, casi el 40 % de la población mundial vive en grandes ciudades. De no cambiar la tendencia, se calcula que en el año 2050 casi el 70 % de la población mundial (unos 5600 millones de personas) habitará en poblaciones de diez millones de habitantes o más. Estas megalópolis, presentes sobre todo en países en vías de desarrollo, plantean importantes desafíos al suministro energético. Habrá que optimizar las infraestructuras energéticas (integración de diferentes redes de suministro y distribución de energía,

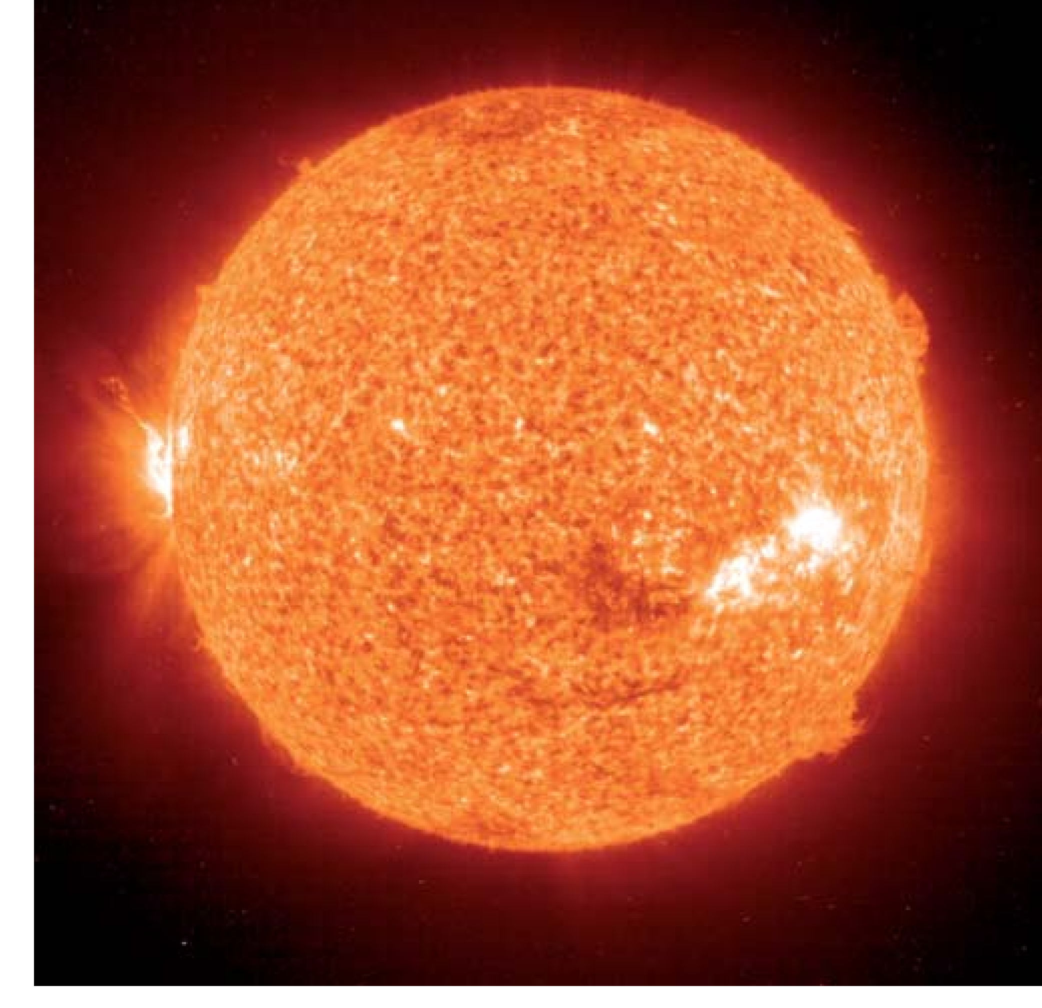
de redes urbanas de transporte, de redes de telecomunicaciones, etc.), implantar sistemas energéticos más limpios, económicos y eficientes, gestionar mejor los residuos, construir edificios energéticamente ecológicos e inteligentes.

Por otra parte, con un nuevo tipo de mercados globalizados la industria energética y eléctrica del futuro se irá estructurando —empieza a hacerlo ya— en compañías que se basarán en mayor medida en sistemas de generación menos centralizados y en microrredes de transmisión de la energía, y se irán abandonando quizá los sistemas integrados tradicionales.

La energía se hallará condicionada por los objetivos y políticas de innovación de las compañías, centradas actualmente en reducir los costes de explotación, una mayor atención al cliente o una alta seguridad de suministro y fiabilidad. Finalmente, las recomendaciones globales de los principales organismos internacionales (Agencia Internacional de la Energía, Consejo Mundial de la Energía, Organismo Internacional de Energía Atómica, Departamento de Energía de EE.UU., Dirección General de Energía de la UE, etc.) tendrán un papel principal en la configuración de la energía en el futuro próximo. Ha de suministrarse energía comercial a los 1700 millones de personas que actualmente carecen de ella, sin descartar ninguna opción energética, sin prescindir de programas de cooperación y solidaridad energéticas.

Necesidades energéticas

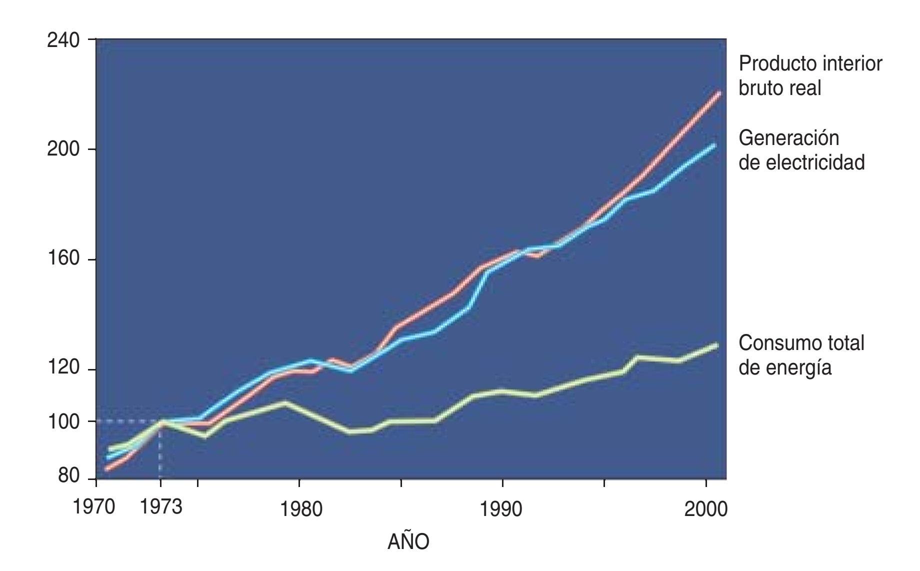
De acuerdo con análisis recientes, se prevé que el consumo energético





1. LAS REACCIONES NUCLEARES crean la energía que nos llega del Sol. Emplearlas en la Tierra para generar energía que no procede, ni directa ni indirectamente, del Sol requiere que se pueda garantizar la seguridad del proceso. Se ve aquí una reproducción, a un cuarto de su tamaño real, de un edificio de protección que alberga un rector de fisión en Japón. En los Laboratorios Nacionales Sandia, de Estados Unidos, se sometió a esta estructura de prueba a presiones internas cada vez mayores, hasta que empezó a perder más gas del que se le inyectaba.

TELESCOPIO PARA LA TOMA DE IMAGENES EN EL ULTRAVIOLETA EXTREMO (EIT), NASA (*arriba*); RANDY MONTOYA, SANDIA (*abajo*)



2. EL CRECIMIENTO ECONOMICO MUNDIAL irá acompañado de un aumento de la electricidad consumida, con independencia de cuánto pueda mejorar la eficacia en su utilización.

anual al menos se duplicará en los próximos 50 años, pasando de los 13 Terakilowatt hora (TkWh, millones de millones de miles de watt hora) del año 2000 hasta entre 23 y 42 TkWh en el año 2050. Una central nuclear típica genera 1 gigawatt (GW, miles de millones de watt) de potencia eléctrica y entrega anualmente, en la práctica, entre un 75 y un 85 por ciento de la energía correspondiente a esa capacidad. Por lo tanto, esa demanda adicional de entre casi mil y más de tres mil GW obligará a construir en 50 años el equivalente de 1000 centrales nucleares, como muy poco, o hasta de 4000, y eso suponiendo que las centrales que se vayan construyendo aún funcionarán en 2050 (una central suele durar entre 25 y 40 años). Pero además hay que reponer las plantas actuales de cualquier tipo, equivalentes a cerca de 2000 centrales nucleares. En total, habrá que construir más de un equivalente de central nuclear por semana, incluso más de dos.

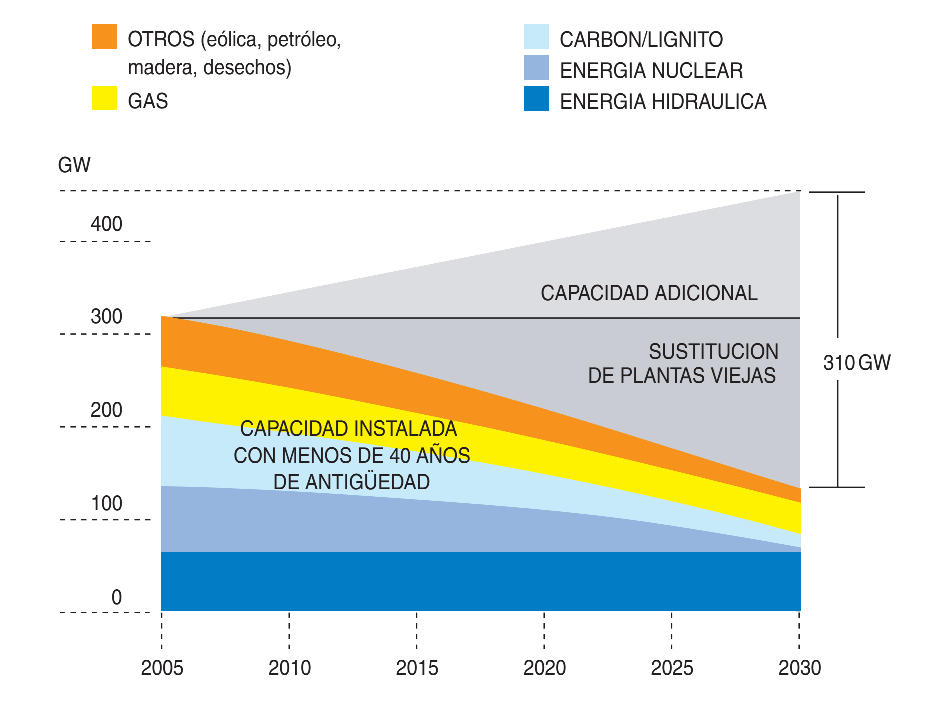
A escala regional las perspectivas pueden ser incluso más preocupantes. La India, con su programa energético "2012 Energía para todos", necesita duplicar su capacidad actual de 121 GW a 250 GW, es decir, añadir a su red, en seis años, una potencia equivalente a 129 centrales nucleares de 1000 MW o casi una central nuclear cada dos semanas.

La situación en la Unión Europea no es más confortable para los próximos 25 años. Con la perspectiva de una progresiva reducción de las energías nuclear, del carbón, del gas y petróleo desde el año 2015, se necesitarían unos 180 GW en el año 2030 para reemplazar las centrales antiguas y 130 GW adicionales para cubrir el incremento de la demanda energética (*figura 3*), es decir, la instalación de más de 300 GW (más de 300 centrales nucleares) en los próximos 25 años.

Por otro lado, la demanda energética mundial no se puede ni se debe reducir, pues aumentaría la pobreza actual de la población sin acceso a la energía comercial. Sólo con que el 10 % de quienes hoy viven sin energía (170 millones de personas) llegasen a disponer de tres kilowatt por persona —la tercera parte del nivel de consumo de energía de los países desarrollados—, se requeriría una capacidad adicional de 500 GW (500 centrales nucleares de 1000 MW o 1000 centrales de ciclo combinado de 500 MW o 500.000 aerogeneradores de 1 MW).

Cambio climático

Uno de los problemas más graves que acechan al desarrollo de la humanidad es el cambio climático, inducido por la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero generados en gran medida al quemar combustibles fósiles. La atmósfera está acumulando más de 2 ppm (partes por millón) de CO_2 al año. Dado que es posible que los casquetes polares empezaran a deshelarse muy deprisa con 440 ppm de CO_2 —suponiendo que no varíe la tendencia en la emisión de los demás gases de invernadero, ni ningún otro factor pertinente—, y dado que la atmósfera ya contiene 380 ppm, cabe pensar que la catástrofe ambiental

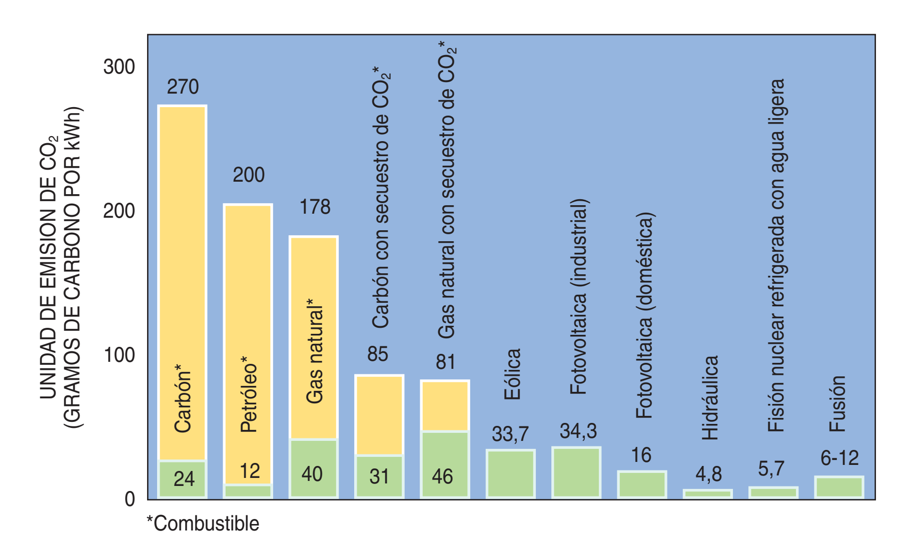


3. NECESIDADES DE ENERGIA ELECTRICA de la Unión Europea (de quince países) en los próximos 30 años.

CORTESIA DEL DEPARTAMENTO DE ENERGIA (DOE), EE.UU., FEBRERO DE 2005 (*arriba*); FUENTE: ENERGY AND TRANSPORT OUTLOOK, UE (*abajo*)

derivada del cambio climático resultará inevitable de aquí en 20 años, si las cosas no cambian.

Los diferentes mecanismos establecidos para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, como el Protocolo de Kyoto, se muestran insuficientes. Es urgente desarrollar técnicas exentas de dichas emisiones. Tanto las técnicas nucleares de generación de energía como las renovables (la solar, la eólica, la hidráulica, la de las olas y las mareas) están casi libres de emisiones de CO_2 (*figura 4*). Nuevas formas de producción de energía con carbón gasificado o a partir de la biomasa podrían también arrojar emisiones netas bajas. En todo caso, el que no emita CO_2 es uno de los factores clave que podrían aconsejar que se mantuviese la fisión nuclear como opción energética válida en el futuro. De hecho, Alemania está realizando estudios para estimar cuánto podría reducir las emisiones de CO_2 la extensión de su parque nuclear actual hasta el 2030 (*figura 5*).



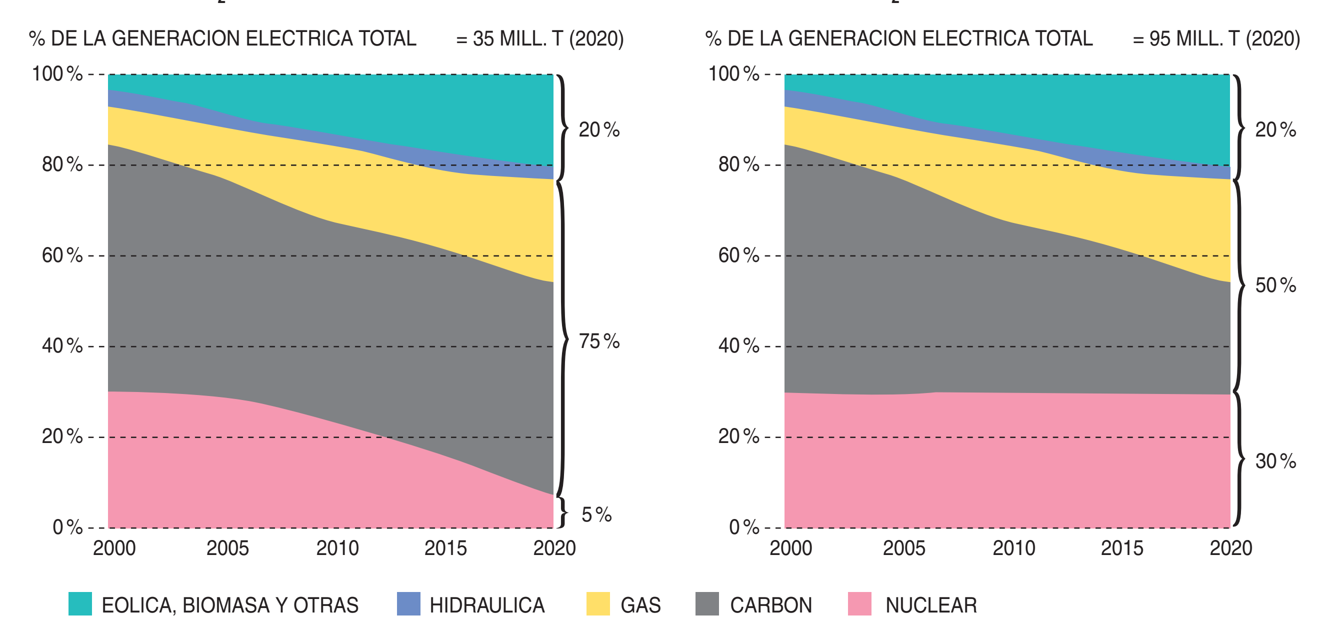
4. EMISIONES DE CO_2 de las diferentes técnicas energéticas. En amarillo se representan las emisiones derivadas del consumo de combustible y en verde las emisiones de los procesos industriales que lo producen.

Lo que cuesta la energía

Si una técnica energética debe ser competitiva en costes con respecto a las demás, también debe serlo la nuclear. Incluso detraídos los gravámenes a las emisiones de CO_2 y prescindiendo de la alta volatilidad del precio del gas, la energía nuclear se muestra competitiva en precios, no obstante sus altos costes de inversión (1500 euros/kW), gracias a sus bajos costes de combustible y de operación y mantenimiento.

En cualquier caso, el gravamen que se imponga a la tonelada del CO_2 emitido determinará la competitividad de las técnicas. Se calcula que, para el año 2020, las más baratas serán la nuclear (3,5 céntimos de euro/kWh) junto con la hidráulica, la eólica y la derivada de la biomasa (3,6-4,4 céntimos de euro/kWh). Resultan muy prometedoras las plantas de emisiones casi nulas de carbón pulverizado y gasificación integrada en ciclo combinado con secuestro de CO_2, que se situarían alrededor de los 5 céntimos de euro/kWh (*figura 6*).

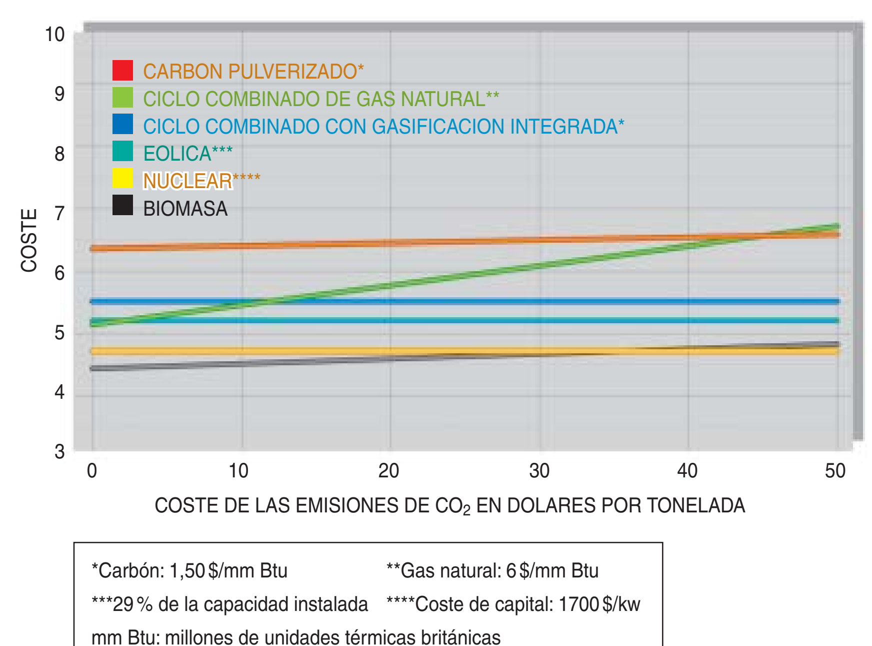
Aunque los altos costes de inversión de la energía nuclear deberán tener garantizada su recuperación en los mercados, mediante contratos estables a largo plazo de venta de energía, como aspecto muy positivo presenta su alto factor de disponibilidad y seguridad de suministro. Existe uranio suficiente para instalar 1000



5. IMPORTANCIA DE LA ENERGIA NUCLEAR en el programa de reducción de emisiones de Alemania.

K. MITSURU Y I. NOBOYUKI, JAERI, *Japan Atomic Research Institut*, KIOTO, JAPON, 2002 (*arriba*); CORTESIA DE VGB PowerTech *"Electricity Generation 2005: Facts and Figures"*, 2006 (*abajo*)

COSTES COMPARATIVOS DE DISTINTAS FORMAS DE GENERAR ENERGIA EN 2020



6. COMPARACION DE COSTES de la energía nuclear, el gas natural, el carbón limpio y las energías renovables, en función del precio que se pueda asignar políticamente a las emisiones de CO_2. (Informe EPRI 2006)

reactores en los próximos 50 años y hacerlos funcionar durante todo su período de vida de 40 años. Además, las centrales nucleares suministran energía a lo largo de casi un 90 % del tiempo, frente a una media europea del 82 % para las centrales de lignito y del 51 % para las de carbón, un 31 % para centrales de gas natural, un 50 % para los aprovechamientos hidráulicos y un 18,5 % para los parques eólicos.

Residuos y seguridad

En todo proceso industrial o de transformación energética se producen residuos. En el caso de los generados en las centrales nucleares, el posible efecto de su radiactividad en el público, el entorno o a las generaciones futuras, se ha convertido en un argumento clave de quienes rechazan la energía nuclear. Desde el inicio de la explotación de las instalaciones nucleares se han desarrollado programas especiales para el tratamiento, transporte y almacenamiento de dichos residuos radiactivos. Para todas estas actividades se han establecido objetivos y criterios muy restrictivos a nivel internacional, nacional y local.

Se están desarrollando procedimientos para el tratamiento definitivo, tanto de los residuos de baja y media actividad generados durante el funcionamiento de las instalaciones nucleares (vitrificación e inertización por plasmas de alta temperatura) como de los de alta actividad, procedentes del combustible ya gastado en las centrales nucleares (el almacenamiento geológico profundo y la transmutación) (*figura 7*). Cabe esperar que en los próximos decenios se encuentren soluciones definitivas y a precios competitivos para el problema de los residuos.

La cuestión de los residuos radiactivos, no obstante, debe encuadrarse en el contexto general de la generación de residuos tóxicos y peligrosos y la emisión de contaminantes a la atmósfera, resultante de todo proceso industrial. En España se generan al año unos 1000 m^3 de residuos de baja y mediana actividad y 200 m^3 de residuos de alta actividad, pero también 4 millones de toneladas de residuos tóxicos son generados industrialmente y 300 millones de toneladas de contaminantes atmosféricos, que producen daños inmediatos en la atmósfera y las capas freáticas.

Comparados con los procedentes de otros tipos de combustible, los costes asociados al tratamiento de los residuos nucleares son muy inferiores; por ejemplo, los del carbón llegan a 1,8 céntimos de euro/kWh, en tanto que los nucleares se cifran en 0,4 céntimos de euro/kWh.

A lo largo de la historia de la energía nuclear ha habido un accidente muy grave (el de Chernobyl en 1986), tres accidentes con riesgo para el exterior de la instalación y varios “incidentes” de diversa gravedad. Puede, sin embargo, afirmarse que la industria nuclear es, dentro de los procesos industriales y energéticos, la que presenta mayores cuotas de seguridad, en su funcionamiento diario, para la población y el medio. Hoy, la industria nuclear tiene interiorizada una “cultura de seguridad” concebida como un atributo más de una explotación.

Sin embargo, se debe todavía avanzar en algunos aspectos importantes de los residuos y la seguridad: su integración en una política energética nacional, mayor claridad en el inventario de los residuos, creación de un protocolo de toma de decisiones sobre emplazamientos a muy largo plazo que potencie la participación de todos los agentes pertinentes, planes de desarrollo comunitario, etcétera. Proceder de estas maneras favorecería el mantenimiento de la opción nuclear.

Uranio e hidrógeno

En los últimos años han aumentado los estudios científicos, técnicos y económicos sobre el hidrógeno como combustible limpio y sus posibilidades en cuanto nuevo “vector energético”, capaz de promover una economía que reduzca la alta presencia del petróleo en el sector del transporte, diversifique el suministro eléctrico y apoye un desarrollo sostenible.

Ante una posible transición de una economía basada en el petróleo a una economía del hidrógeno, la demanda de H_2 crecerá en los sectores del transporte, la construcción y la industria. Se requerirá, por tanto, una fuente de producción masiva de hidrógeno. Reactores nucleares avanzados que empleasen como refrigerante gas a muy alta temperatura ofrecerían un medio para la producción de H_2 a gran escala y de forma limpia. Esos

INFORME EPRI JOURNAL, VERANO DE 2006

reactores aportarían el calor necesario para que se produjesen las reacciones con ácido sulfúrico a elevadas temperaturas que generan hidrógeno a partir del agua. Esta producción masiva de hidrógeno con técnicas nucleares reviste particular interés si se piensa que será el sector del transporte el primero en incorporar el hidrógeno a gran escala.

Nuevo modelo energético

Más allá de las ventajas puramente científicas y técnicas de la energía nuclear, hay otros aspectos que merecen analizarse para garantizar su viabilidad. De entrada, los relacionados con el "desarrollo sostenible", expresión que designa un modelo de crecimiento que, satisfaciendo las necesidades presentes, no hipoteque el bienestar de las generaciones futuras.

Más del 35 % de las generaciones actuales no tienen cubiertas sus necesidades básicas de energía y desarrollo. Para una parte extensa de la humanidad no existe desarrollo, su situación es "insostenible" y todo es pura necesidad. Actualmente, unos 25.000 niños menores de 5 años mueren cada día (más de 9 millones al año) por enfermedades derivadas de la falta de energía, de agua potable y de otros bienes. Al mismo tiempo, casi el 20 % de la humanidad consume el 80 % de los recursos energéticos gastados en total.

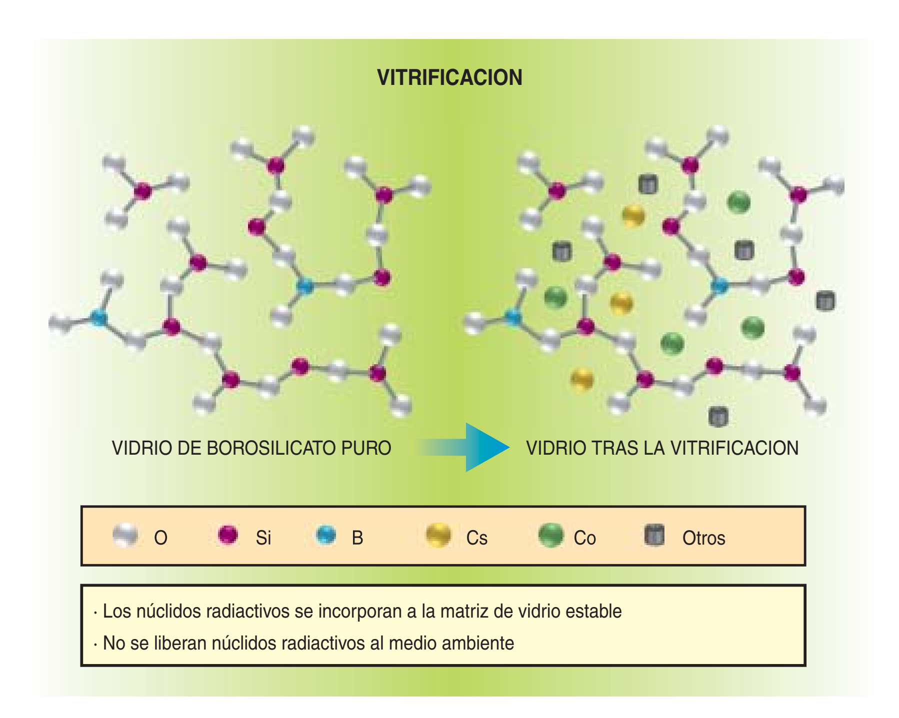
No basta por tanto con preocuparse por las generaciones futuras. ¿Qué pasa con un tercio de las actuales, que no tienen satisfechas sus necesidades básicas? Los países más ricos pueden forzar la sostenibilidad de su desarrollo a costa de otros. Aunque el primer mundo fomenta el ahorro y la eficiencia energética, hasta el punto de reducir a la mitad su intensidad energética, o energía consumida por unidad de producto nacional, ante cualquier perturbación energética no ha dudado tristemente muchas veces en acudir a la confrontación bélica para mantener su situación de privilegio. (Los intereses multinacionales por el control de los recursos energéticos de la república del Congo han propiciado una guerra que se ha cobrado en los últimos años más de tres millones de muertos.)

No basta tampoco con preocuparse por los 10.000 años de actividad de los residuos radiactivos. ¿Qué sucede con el CO_2 actual y los residuos tóxicos y peligrosos que están destruyendo el planeta? Existen ciertas premisas energéticas de los países desarrollados que, aunque no indicadas de forma explícita, se aceptan tácitamente y fundamentan las estrategias y modelos. Se las podría resumir en tres. Según la primera, la situación energética actual es "confortable"; no existe una necesidad urgente de desarrollo de técnicas avanzadas de producción energética y los combustibles fósiles seguirán siendo la base del suministro en los próximos decenios. Una segunda premisa afirmaría que, aun cuando adelantaran su desarrollo, las nuevas generaciones de reactores de fisión, la fusión nuclear y las energías renovables, resultarían muy caras. Finalmente, la tercera plantearía como solución que esas técnicas avanzadas se implantasen sólo paulatinamente.

Estas premisas contrastan, sin embargo, con la situación y realidad energética de los países pobres y en vías de desarrollo, cuya situación energética es "catastrófica e insostenible". Desde el punto de vista de la demanda de recursos, se teme a corto plazo un uso masivo de combustibles fósiles, con un impacto catastrófico en el ambiente. Las naciones serán muy vulnerables a las subidas de precios de esos combustibles, que podrían llegar a resultar inasequibles para los países en vías de desarrollo y

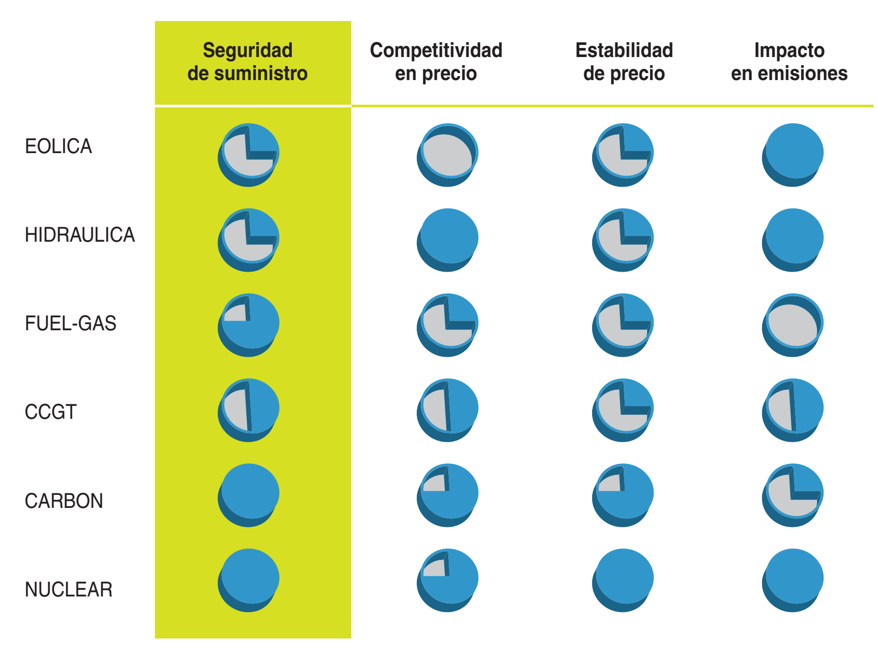
ENERGIA NUCLEAR Y DENSIDAD DE POTENCIA

Madera	15 KJ/gr	4,16 kWh/kg
Carbón	29 KJ/gr	8,05 kWh/kg
Petróleo	42 KJ/gr	11,6 kWh/kg
Gas	55 KJ/gr	15,27 kWh/kg
Hidrógeno	120 KJ/gr	33,33 kWh/kg
Uranio	580 MJ/gr	161.110 kWh/kg



7. **VITRIFICACION POR PLASMA** para la inertización y reducción de volumen de residuos radiactivos de baja y media actividad.

CHANG SUN KANG, "*A Bold approach in Reducing LLW volume: vitrification*", 7 DE MAYO DE 2003, CONFERENCIA ICAPP 2003, CORDOBA, ESPAÑA



8. COMPARACION DE LA ENERGIA NUCLEAR con otras técnicas en algunos de los aspectos que deberían tomarse en cuenta al elegir fuentes de energía.

les conduciría a un estrangulamiento económico.

Mas, por otro lado, de los estudios comparados de costes se infiere que tanto las técnicas nucleares actuales y avanzadas como las energías renovables podrían no ser en el futuro mucho más caras que las técnicas energéticas basadas en los combustibles fósiles. Para ello, sería necesaria una política agresiva que fomentase su desarrollo acelerado y su entrada rápida en el mercado.

En realidad, no parece tampoco justo hablar de "largo plazo" o "desarrollo lento de las técnicas avanzadas", cuando es conocida su disponibilidad en el terreno militar. Hoy, un freno en el desarrollo de la energía nuclear no garantizaría el abandono de su aplicación militar.

Técnicas avanzadas

Ante la situación energética descrita, una reducción mundial del consumo energético no sería una alternativa realista y posible. Tampoco lo sería el mantenimiento del *statu quo* sometido a las premisas energéticas de los países desarrollados; a la larga supondría un estrangulamiento de los países en vías de desarrollo y conduciría a un mundo polarizado, con una minoría pletórica y una gran masa de la humanidad en la más absoluta pobreza, con un alto riesgo de ciclos bélicos.

Por tanto, parece que la única alternativa realista que se nos presenta será el desarrollo rápido de técnicas avanzadas (*figura 8*). Requerirá grandes inversiones por parte de los países industrializados para sacar adelante nuevas generaciones de reactores nucleares (de fisión, de fusión y de transmutación), energías renovables y de hidrógeno, así como técnicas limpias basadas en los combustibles fósiles. Unos 16 billones de euros harían falta. Sin embargo, sólo se tomará ese camino si se adoptan unos cambios estructurales profundos en las políticas energéticas mundiales, que en adelante deberían atenerse a los criterios que proponemos de una "energía ética". La producción "ética" de energía no se regiría sólo por principios económicos y de protección del medio, sino también por una intención de distribuir de manera más equilibrada los recursos. Los programas de inversión podrían costearse mediante una profunda reconversión de los gastos militares. Habría que transferir a los países pobres métodos eficientes de suministro y uso de la energía, ya probados en los países desarrollados, para ayudar a que su desarrollo se acelere.

Las técnicas nucleares actuales y avanzadas pueden representar la mayor fuente de suministro masivo de energía para satisfacer las grandes demandas energéticas en el futuro; poseen altísimas cotas de seguridad; son respetuosas con el medio al no emitir CO_2, y a su vez aportan un gran desarrollo de conocimiento con altos beneficios sociales para la humanidad en medicina, industria, agricultura, etcétera, aunque suponen un gran desafío ético debido a sus aplicaciones militares.

El futuro de la energía nuclear como opción viable y su aceptación por la opinión pública, lejos de basarse en sus logros técnicos, en su rendimiento y seguridad, dependerá de un cambio radical del modelo energético actual y de una respuesta a cuestiones del tenor siguiente: "¿Quién necesita las técnicas nucleares avanzadas, la fisión o la fusión?" "¿Dónde están las inversiones?". En 1960 el académico ruso Lev Andreevich Artsimovich, inventor del dispositivo Tokamak de fusión nuclear, afirmaba que el primer sistema de fusión se construiría cuando su intervención resultara apremiante. De que se perciba la necesidad de la energía nuclear dependerá que tenga cabida en el futuro.

El autor

José Antonio Tagle es doctor en ciencias físicas y jefe del departamento de innovación y negocios de IBERDROLA S.A.

Bibliografía complementaria

THE FUTURE OF NUCLEAR POWER. S. Ansolabehere et al. Massachusetts Institute of Technology, 2003.

GENERACIÓN DE H_2 MEDIANTE GENERACIÓN DE CALOR A ALTA TEMPERATURA: POSIBILIDADES DE LA ENERGÍA NUCLEAR. A. de la Torre, José A. Tagle y Emilio Mínguez, XXX Reunión Anual Sociedad Nuclear Española, Alicante, 29 septiembre-1 octubre, 2004.

ENERGY EFFICIENCY. Electric Power Research Institute, Journal Summer 2006.

ELECTRICITY GENERATION 2005: FACTS AND FIGURES. VGB Power Technic, 2006.

WORLD ENERGY OUTLOOK 2005. International Energy Agency, OCDE, 2006.

Norbert Treitz

Proporciones energéticas

Problemas técnicos aparte, ¿qué nos impide convertir un terrón de azúcar "totalmente en energía", como puede leerse erróneamente tan a menudo?

Si varía la energía en una cantidad *L*, entonces la masa cambia en un factor $L/9{\cdot}10^{20}$ en el mismo sentido, *m*, si se miden la energía en erg y la masa en gramos.

Así aparece escrito justo antes del final del artículo "¿Depende de su contenido de energía la inercia de un cuerpo?", que Einstein envió a los *Anales de la Física* en septiembre de 1905.

Si dos magnitudes cambian siempre en un mismo sentido y por un mismo factor, sólo se distinguirán en una constante aditiva. En el marco de la mecánica clásica, nuestra acostumbrada aproximación a la mecánica relativista, perfectamente aplicable a objetos lentos, tenemos una idea clara de lo que significa una masa 0. Ahora bien, según nos convenga desplazamos el origen de la energía una vez hasta una distancia infinita y otra hasta la mesa del laboratorio. No entraña, pues, problema alguno concederle el mismo origen a la energía que a la masa. Lo que nos lleva a la fórmula $E = mc^2$, donde la masa sólo difiere de la energía en las unidades.

Encierran una importancia particular la expresión "en el mismo sentido" de la cita. Si se tratara de una transformación entre masa y energía, como se acostumbra a leer, tendría que decir "en sentido contrario". A una falsa interpretación como ésa se llega por un balance inadecuado: se observa la masa que disminuye en *A* y la energía que aumenta en *B*. Pero no se trata de ninguna transformación, sino de una transferencia de una misma magnitud de *A* en *B*, a la que podemos denominar masa o energía.

En cada sistema de referencia individual se hace evidente que la energía *E* es la suma de una energía en reposo, E_0, y una energía de movimiento, E_k. Además, el cociente E_k/E resulta ser un número entre 0 y 1. Su valor depende de la velocidad, de la forma siguiente: $E_k/E = 1 - (1 - v^2/c^2)^{1/2}$. Si *v* es pequeña comparada con la velocidad de la luz en el vacío, *c*, entonces será igual a $v^2/(2c^2)$; mas, para $v = c$, valdrá 1.

La expresión que acabamos de reseñar significa que, lo que se mueva a velocidad *c* no tiene ninguna energía en reposo, sino sólo energía en movimiento, y su masa es igual a $E/c^2 = E_k/c^2$. En el recuadro 1 se muestra E_k/E en una escala logarítmica. El aspecto de la escala de velocidades en el margen derecho permite reconocer las dos aproximaciones mencionadas: su longitud dobla la de la escala (E_k/E) para *v* pequeñas, y aún más en las cercanías de *c*.

La palabra "masa" se utiliza a menudo, y en mala hora, en el sentido de "masa en reposo", y entonces se dice que el fotón es una "partícula sin masa". Si esto se tomara en su sentido literal, se estaría en contradicción con la fórmula de equivalencia.

Potenciales gravitatorios

Una vez que una nave espacial ha gastado la energía de movimiento que se le impartió en el lanzamiento, ésta pasa al campo gravitatorio. Suele asignársela a la nave espacial como "energía potencial". Cuando se alza o baja un objeto de masa *m* en un campo gravitatorio, la energía que se le proporciona al campo (o, correspondientemente, que se le extrae) es proporcional a *m*. Al cociente entre la energía y la masa se le puede denominar diferencia de energía potencial. Cabe asignar dichos potenciales a las diferentes alturas sobre la superficie de un planeta (con una elección adecuada del origen de la energía potencial), que no dependen de las masas de los cuerpos desplazados (sean escaladores o cohetes enviados a la Luna). La unidad de masa del potencial gravitatorio es joule/kilogramo. Pero masa y energía son ahora lo mismo, exceptuando el factor de conversión c^2. El potencial gravitatorio constituye una magnitud adimensional. En el campo homogéneo cercano a la superficie de la Tierra (esto es, en la aproximación de muy pequeñas fracciones del radio terrestre) corresponde al producto de la altura y de la aceleración de caída *g* (esto es, intensidad del campo gravitatorio).

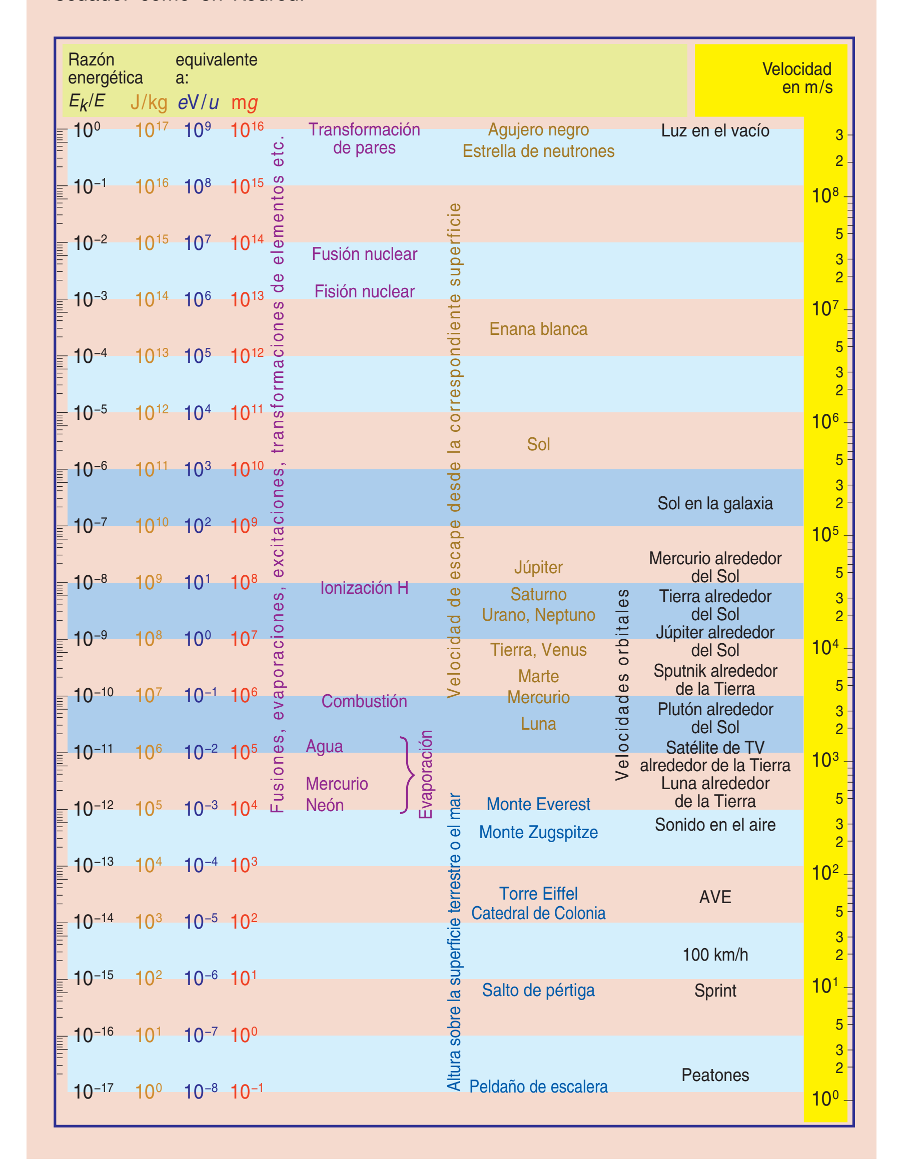
Un saltador de pértiga transforma energía de movimiento en este tipo de energía dependiente de la altura. Toma carrerilla, almacena su energía de movimiento temporalmente en la deformación elástica de la pértiga y la transfiere al campo gravitatorio en su distensión. Así, a una velocidad inicial de 10 metros por segundo llega a una altura de 5 metros, o algo más, gracias al trabajo de los brazos y la longitud de las piernas.

La comparación entre energía dependiente de la altura y la de movimiento puede servir para la educación vial. La velocidad de un coche celerísimo viene a ser la de un objeto que cae desde la altura de la catedral de Colonia, con consecuencias comparables cuando la velocidad se reduce de repente a cero.

Con el campo eléctrico ocurre lo mismo que con el campo gravitatorio. Si: un objeto dotado de carga eléctrica se mueve en un campo eléctrico, entonces la extracción del campo o el almacenamiento en éste es proporcional a su carga. Tiene, pues, sentido calcular el cociente de la diferencia de energías y la carga: la tensión eléctrica. En la electrostática y con corriente continua (o sea, con campo estacionario), la tensión sólo depende de la posición del punto final del recorrido. En consecuencia, se les puede asignar potenciales a los diferentes puntos, unívocamente definidos al elegir un origen de energías.

¿QUE PARTE LE CORRESPONDE A LA ENERGIA CINETICA?

La relación E_k/E entre la energía cinética y la energía total se representa con una escala logarítmica: desde el valor máximo 1 (*arriba*) hasta los peatones como medida de todas las cosas, con 10^{-17} (*abajo*). Las correspondientes velocidades (*derecha*) se aclaran con ejemplos. La velocidad de escape es la velocidad inicial mínima necesaria para abandonar el objeto astronómico, desde su superficie hasta el infinito, siempre que no hubiera ninguna estrella u otras masas. Por eso se invierte toda la energía cinética inicial en el campo gravitatorio, y para el propio movimiento no queda nada; esto es, se llega muy lentamente al infinito. Para la Tierra su velocidad de escape es de 11,2 kilómetros por segundo; al despegar hacia el este se recibe una parte de la rotación terrestre como regalo, especialmente si se está tan cerca del ecuador como en Kourou.



SIGANIM/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT/NORBERT TREITZ

Explotación de la transformación

Un fotón choca contra un átomo y lo cambia de estado. ¿Adónde va la energía del fotón? Al campo eléctrico de su nube de electrones. El electrón "salta a una órbita superior" y deviene por ello más lento; por tanto, cierta energía de movimiento ha ingresado en el campo eléctrico. Este balance sigue siendo válido, aun cuando la indeterminación de la mecánica cuántica nos impida hablar de órbitas.

Si nos ceñimos al átomo de hidrógeno, el electrón presenta, en su estado fundamental, una energía de movimiento de 13,6 eV, equivalente a una velocidad *c*/137. (La unidad de energía eV es el producto de un volt y la carga elemental e_0, la del electrón excepto por el signo; de ahí la designación "electronvolt", que lleva fácilmente a confusión.) Para liberar el electrón totalmente de su ligadura al átomo (esto es, para ionizar el átomo), se necesitan de nuevo 13,6 eV. ¿Se deben designar los 27,2 eV que están ahora incluidos en el campo eléctrico entre el núcleo y el electrón "energía potencial del electrón"? No tendría sentido; el electrón no volverá a encontrar "su" núcleo. Lo que se ioniza, o —con menores captaciones de energía— se excita, es el átomo. Relacionamos pues los cambios de energía con su masa (correspondientemente, con su energía).

¿Dónde estaba antes escondida la energía que se libera durante una combustión? En el combustible, responde molesto el cliente de la gasolinera porque, a diferencia del oxígeno, debe pagarlo. Pero si hubiésemos vivido en la primitiva atmósfera reductora —con abundancia de metano—, habríamos llegado a otra idea, parcial también. El astronauta que debe pechar con ambos componentes se ve obligado a ver el asunto en sus justos términos.

Fuego, un miserable millardésimo

Tomemos un kilogramo de aceite y dejemos que reaccione con oxígeno catalíticamente o a una temperatura de ignición adecuada. Como personas que razonan desde una óptica física, prescindimos de la diferencia entre ambas reacciones químicas; hacemos caso omiso, además, de la diferencia entre aceite de ensalada y gasóleo. Durante la reacción se produce agua y dióxido de carbono; por cada kilogramo de aceite se liberan alrededor de 40 megajoule de energía, que podemos utilizar para calentar o para poner algo en movimiento. En la transformación inversa (fotosíntesis), la mezcla de agua y dióxido de carbono se vuelve a "excitar" con energía solar.

Si se dividen los 40 megajoule entre la masa de aceite y oxígeno y se sigue calculando con $E = mc^2$, se descubre que la química de mezclas ricas en combustible es una ciencia de la décima posición decimal [*véase*

“Un golpe transmite el siguiente”; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2006]. Otras reacciones químicas se encuentran aún mucho más lejos de la coma decimal; dígase lo propio de la evaporación,

Más productivas son las transformaciones de elementos en la física nuclear. En la fisión, la explotación energética es de 10^{-3}: alrededor de 200 MeV (megaelectronvolt) de energía liberada por núcleo atómico con una masa equivalente a unos 200 Gev (gigaelectronvolt). La energía se le quita al campo eléctrico del núcleo atómico; además tiene que pagar un aumento de la energía superficial de los núcleos. En cambio, en la fusión nuclear de hidrógeno a helio se crea un campo eléctrico entre los protones, que se financia, igual que la explotación de unos 7 MeV/GeV = $= 0{,}7 \cdot 10^{-2}$ de energía radiante y cinética, a partir de la reducción de la energía superficial (interacción fuerte, fuerza de color).

Las siete potencias de diez entre la fisión nuclear y la combustión son las mismas que entre los kilogramos de plutonio de la bomba de fisión nuclear y los kilotones de trinitrotolueno de una bomba ordinaria que alcanzara la misma capacidad destructiva.

Durante la transformación de pares de la misma cantidad de materia y antimateria, podemos considerar a los fotones como el resultado de la explotación, de un 100 por ciento. Un par electrón-positrón nos “trae” alrededor de 1 MeV, un par protón-antiprotón aproximadamente 1800 veces eso: casi 2 GeV. En este año 1905 + 101 todavía hay quien se pregunta cuánta energía se obtendría de un terrón de azúcar si no sólo se le quemara, sino si se le “transformara totalmente en radiación”. Mas para ello se necesitaría un compañero de reacción, esto es, antimateria con la misma cantidad de masa; por una razón poderosa: para los números bariónicos y leptónicos valen reglas de conservación.

Algunas relaciones en diagonal

El mensaje de los dos diagramas que ofrecemos no reside de modo primordial en los datos, ni siquiera en la comparación de datos de la misma naturaleza, sino en las relaciones en diagonal, perceptibles una vez realizados los cálculos de una misma escala de proporciones energéticas. Se pueden dar las energías cinéticas astronáuticas relacionadas con la masa no sólo en joule por kilogramo sino también en eV/u (u es la unidad de masa atómica, casi la masa del átomo de hidrógeno), o de forma adimensional. O bien se las compara con un hipotético campo gravitatorio homogéneo que fuera tan intenso en todo el universo como el que experimentamos sobre la superficie terrestre.

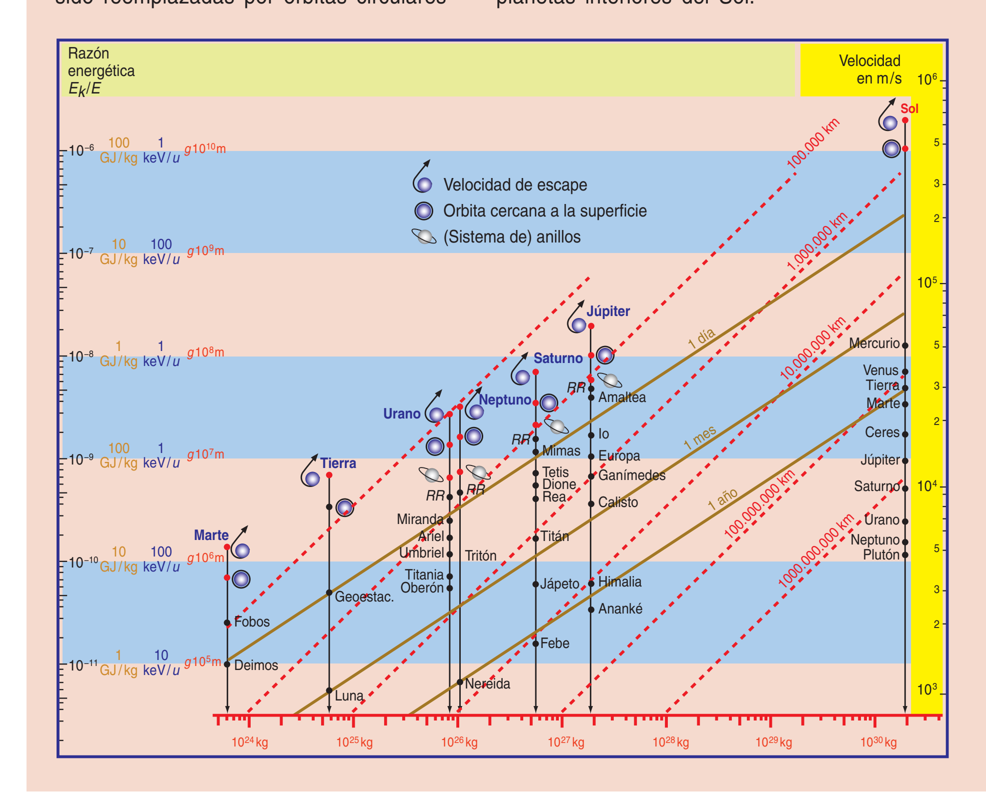
También se ve cuánta energía tiene la Tierra por su movimiento en torno al Sol: casi 5 milmillonésimas de su energía total, y con ello 15 veces más de la que se podría conseguir a través de su combustión completa si no estuviera compuesta más que de carbono y oxígeno.

PROPORCIONES ENERGETICAS EN EL SISTEMA SOLAR

Esta parte del anterior gráfico se amplía con una escala horizontal, en la que se han representado logarítmicamente las correspondientes “masas centrales”.

Para una estrella, un planeta o cualquier esfera isótropa de masa M y radio R, no hay sólo una velocidad de escape, sino también una velocidad para una órbita circular cercana a la superficie. En el caso de la Tierra se cifra en unos 7,9 kilómetros por segundo. Un objeto de masa m, que orbite alrededor de un cuerpo central siguiendo una trayectoria circular de radio r, tendrá una velocidad orbital $v = [(M + m)\, G/(2r)]^{1/2}$ o $v = [MG/(2r)]^{1/2}$, si m es despreciablemente pequeña comparada con la masa M del cuerpo central; G es la constante de gravitación universal. En el gráfico se encuentran los nombres de los satélites y de los planetas, según sus velocidades; las órbitas elípticas han sido reemplazadas por órbitas circulares con el mismo diámetro mayor. Radios orbitales idénticos caen en una misma recta de pendiente 1, períodos orbitales idénticos sobre rectas de pendiente 2/3.

El símbolo *RR* identifica el radio de Roche: dentro de esta frontera la inhomogeneidad del campo gravitatorio vence a la atracción mutua entre partículas de polvo vecinas, que por ello no se aglutinan dando lugar a una luna, sino que se desmigajan en un anillo [véase “Dammi y las fuerzas ficticias”; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, joule 2006]. Los huecos en los sistemas de anillos se deben a los cocientes casi racionales de los correspondientes períodos orbitales y los de los satélites pesados: las piedrecillas que se encuentren en esos radios sufren perturbaciones periódicas y acaban por emigrar. De manera similar, nuestros planetas gigantes velan por que haya órbitas libres en el cinturón de los planetas interiores del Sol.



SIGANIM/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT/NORBERT TREITZ

Juan M.R. Parrondo

La joya oculta

Algunos piensan que la matemática es una construcción del ser humano. Otros defienden lo contrario: que las verdades matemáticas están —desde siempre— "ahí afuera", esperando ser descubiertas. La historia de la matemática da y quita la razón a ambas posturas: en ocasiones los matemáticos construyen realidades matemáticas como si fueran artefactos, pero muchas otras veces —quizá las más— parecen desorientados exploradores de un territorio virgen. A este segundo caso pertenece la invención de los logaritmos por John Napier (o Neper) en 1614. Napier se enfrentó a un problema que podía resolverse de dos maneras. Eligió la más complicada (aunque luego rectificaría con la ayuda de Henry Briggs) y encontró, sin darse cuenta, una auténtica joya, el número *e*. Napier lo tuvo en sus manos, sin percatarse de su inmenso valor. De hecho, el número *e* estuvo oculto en el corazón de los logaritmos *neperianos* originales (que son distintos de los neperianos modernos) hasta que Euler, un siglo después, lo hiciera brillar con todo su esplendor.

Los logaritmos nacieron como una herramienta, un truco, para calcular rápidamente proporciones, productos, raíces y potencias. Fueron descubiertos a finales del siglo XVI independientemente por Napier y por Burgi, quien, sin embargo, no dio la publicidad debida a su hallazgo. Napier sí publicó sus tablas en latín en 1614: *Mirifici logarithmorum canonis descriptio*, traducida al inglés en 1616 con el título: *A description of the admirable table of logarithmes*. Después de morir Napier, se publicó en 1619 su *Mirifici logarithmorum canonis constructio*, en donde explica en detalle cómo había construido las tablas de la *Descriptio* de 1614. Burgi y Napier se basaron en una idea que se remonta al menos a Arquímedes. Consideremos la siguiente tabla de potencias de 2:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2^n	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096

Multiplicar y dividir los números de la segunda fila de esta tabla es muy sencillo. Por ejemplo, para calcular 16 × 64 basta sumar los números correspondientes de la primera fila: 16 es la cuarta potencia de 2 y 64 la sexta; sumamos entonces 4 y 6, y obtenemos 10; el resultado del producto es entonces la potencia décima, es decir, 16 × 64 = 1024. Hoy llamamos "logaritmos en base 2" a los números de la primera fila. Elevar al cuadrado un número es también muy sencillo: basta multiplicar por dos su logaritmo. Finalmente, las raíces cuadradas o cúbicas se calculan dividiendo el logaritmo por dos o por tres, respectivamente. Cálculos complicados como:

$$\frac{\sqrt[2]{1024} \times 4^5}{\sqrt[3]{64} \times 256}$$

se simplifican enormemente con la tabla de logaritmos: el logaritmo de 1024 es 10, el de 4 es 2, el de 64 es 6, el de 256 es 8. La operación anterior, con logaritmos, se reduce a 10/2 + 2 × 5 − 6/3 − 8 = 5, que es el logaritmo de 32. Por tanto, el resultado de la expresión anterior es 32.

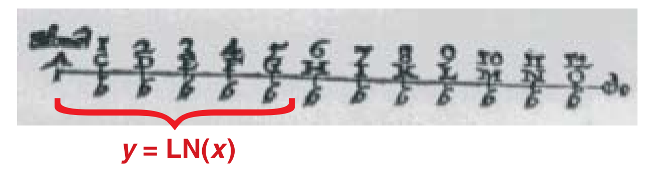
La idea es muy sugerente, pero tiene limitaciones obvias. La primera es que sólo podemos aplicarla a cálculos con los números que aparecen en la tabla, es decir, con potencias de 2. En segundo lugar, ¿qué ocurre si después de operar con los logaritmos el resultado es negativo o fraccionario? La solución más sencilla es ampliar la noción de potencia a exponentes negativos y fraccionarios. La regla de cálculo de logaritmos nos dice que dividir el logaritmo entre 2 es equivalente a extraer su raíz cuadrada. Análogamente, podemos definir, por ejemplo, $2^{1/2} = \sqrt{2} = 1{,}414...$ También de acuerdo con las reglas anteriores, los exponentes negativos tienen que definirse en la forma: $2^{-n} = 1/2^n$.

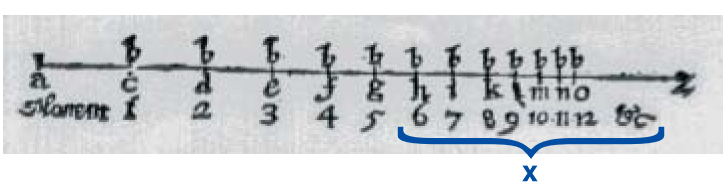
Esta es la solución sencilla —al menos a nuestros ojos— de las limitaciones de la idea original de Arquímedes. Otra posibilidad, bastante más complicada, es escoger una base próxima a la unidad, que daría lugar a potencias muy cercanas entre sí. Probablemente Napier partió de esta idea, pero la refinó utilizando un símil cinemático. Sabía que la esencia del truco de Arquímedes era comparar una progresión geométrica con una aritmética, pero necesitaba progresiones que recorrieran todos los números posibles.

Imaginó entonces dos puntos moviéndose sobre sendas líneas. El primero con velocidad constante v_0 y el segundo con una velocidad proporcional a la distancia x que le separa del fin de la línea. En la figura 1 vemos los grabados originales de Napier. En la línea superior, el móvil se mueve a velocidad constante y los puntos CDEFG, etc. muestran su posición a intervalos regulares de tiempo. En la línea inferior, otro móvil se mueve con una velocidad decreciente, proporcional x: recorre los puntos *acdefg*, etc., a intervalos regulares de tiempo; pero, como la velocidad disminuye paulatinamente, estos puntos están ahora cada vez más cercanos entre sí. Los puntos de la línea superior desempeñan la función de la progresión aritmética y los de la inferior el de la progresión geométrica: los intervalos AB, AC, AD, etc. difieren en una cantidad constante, mientras que en la línea inferior son los cocientes entre los intervalos *ab*, *ac*, *ad*, etc. los que son constantes. Finalmente, Napier define el logaritmo $y = \mathrm{LN}(x)$ de un número x de la siguiente forma: cuando el punto de la línea inferior se encuentra a una distancia x del final de la misma, el punto de la línea superior ha recorrido una distancia $y = \mathrm{LN}(x)$.

Los logaritmos neperianos modernos son diferentes. Hoy sabemos que el punto de la línea superior se mueve siguiendo la ecuación $y(t) = v_0 t$, mientras que el inferior, cuya velocidad en un instante t es $v(t) = v_0 x(t)/w$, obedece a la ecuación $x(t) = we^{-v_0 t/w}$. De ello se deduce la relación entre los neperianos modernos y los antiguos:

$$LN(x) = -w \ln \frac{x}{w}$$





1. Los dos movimientos de Napier: en el de arriba el móvil avanza con velocidad constante y en el de abajo con velocidad proporcional a la distancia *x* que separa el punto del final *z* de la línea. Para una distancia *x*, Napier define el logaritmo de *x*, LN(*x*) como la distancia *y* que ha recorrido el móvil de la línea superior.

Deg. 1 +|—

m.	Sines.	Logarith.	Differen.	Logarit.	Sines.	
0	17452	4048276	4048124	152	999848	60
1	17743	4031748	4031591	157	999843	59
2	18034	4015490	4015327	163	999837	58
3	18325	3999492	3999324	168	999832	57
4	18615	3983745	3983571	173	999827	56
5	18907	3968242	3968063	179	999821	55
6	19197	3952976	3952792	184	999816	54
7	19488	3937941	3937751	190	999810	53
8	19779	3923127	3922932	196	999804	52
9	20070	3908531	3908329	201	999799	51
10	20361	2894144	3893937	207	999793	50
11	20652	3879961	3879748	213	999787	49
12	20942	3865977	3865757	219	999781	48
13	21233	3852186	3851960	225	999774	47
14	21524	3838582	3838351	232	999768	46
15	21815	3825161	3824923	238	999762	45
16	22106	3811918	3811674	244	999756	44
17	22396	3798848	3798597	251	999749	43
18	22687	3785947	3755690	257	999742	42
19	22978	3773210	3772946	264	999736	41
20	23269	3760634	3760363	271	999729	40
21	23568	3748213	3747936	278	999722	39
22	23850	3735946	3735661	284	999715	38
23	24141	3723827	3723535	291	999708	37
24	24432	3711853	3711555	299	999701	36
25	24723	3700021	3699715	306	999694	35
26	25014	3688327	3688014	313	999687	34
27	25304	3676769	3676449	320	999680	33
28	25595	3665343	3665015	328	999672	32
29	25886	3654045	3653710	335	999665	31
30	26177	3642875	3642532	343	999657	30

Min.

Deg. 88

2. Extracto de una de las tablas de logaritmos originales de Napier.

Napier tomó como longitud total de la línea *az* la cantidad $w = 10^6$. En la figura 2 tenemos una de las tablas de la *Descriptio,* cuyos valores son sorprendentemente precisos. Por ejemplo, para $x = 18.907$, una calculadora moderna nos da LN(18.907) = 3.968.223,055, que difiere del calculado por Napier, 3.968.242, en sólo 19 unidades en casi cuatro millones.

Con la definición de Napier, si dos parejas de puntos del movimiento de la línea inferior guardan la misma proporción:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{x_3}{x_4},$$

entonces los puntos correspondientes en la línea superior, es decir, sus logaritmos, tendrán incrementos iguales:

$$LN(x_1) - LN(x_2) = LN(x_3) - LN(x_4)$$

y esta propiedad es la clave para la función última de los logaritmos: convertir productos y cocientes en sumas y restas.

¿Cómo pudo calcular Napier sus logaritmos con esta increíble precisión? Utilizó algo que hoy llamamos "integración numérica de una ecuación diferencial", pero con trucos bastante ingeniosos que le permitieron culminar la tarea, aunque empleara en ello unos veinte años. Comenzó calculando la posición *x* del móvil de la línea inferior con pequeños intervalos de tiempo. Si la velocidad inicial es $v_0 = 1$, una estimación de la posición del móvil al cabo de un segundo será $x(1) = w - 1 = w(1 - 1/w)$. Al cabo de 2 segundos, $x(2) = (w - 1) - (w - 1)/w = w(1 - 1/w)^2$ (recordemos que la velocidad en cada instante es x/w). Es decir, podemos encontrar la posición en el tiempo $x(t + 1)$ sin más que sustraer a $x(t)$ su 10^6-ava parte: $x(t + 1) = x(t)(1 - 1/w)$. En los instantes iniciales del movimiento, este cálculo hace descender *x* prácticamente en intervalos de una unidad. Sin embargo, para *x* menores, el descenso es mucho más lento. Por ejemplo, si $x(t) = 1000$, $x(t + 1) = 999{,}999$. Napier habría necesitado millones de operaciones para construir sus tablas con intervalos de un segundo. Halló entonces el modo de simplificar el cálculo utilizando intervalos de tiempo más largos cuando la velocidad es tan baja, que el móvil apenas varía su posición en un segundo. Este es el método de paso de tiempo variable, aplicado hoy en algunas simulaciones numéricas de sistemas dinámicos. Napier calculó tablas con diferentes pasos de tiempo y luego las refinó y combinó por medio de interpolaciones y otros trucos bastante ingeniosos.

La mayoría de sus argumentos se basaban en la intuición que le proporcionó el símil cinemático. Napier encontró sus logaritmos, íntimamente relacionados con los neperianos modernos, sin conocer la base de estos últimos, el número *e*. Sin embargo, el número *e* estaba en el corazón de su modelo cinemático y también en sus cálculos, puesto que utilizó constantemente expresiones del tipo $(1 + 1/w)^k$ con *w* igual a un número muy grande (10^6 y, originalmente, 10^7). La definición moderna del número *e* emplea este tipo de potencias: es un cierto tipo de límite de números infinitamente cercanos a 1 elevados a exponentes infinitamente grandes.

parr@seneca.fis.ucm.es

Mark Fischetti

ESTABILIZACION DE IMAGENES

Una cámara muy quieta

"Quieto, quieto, que va la foto".

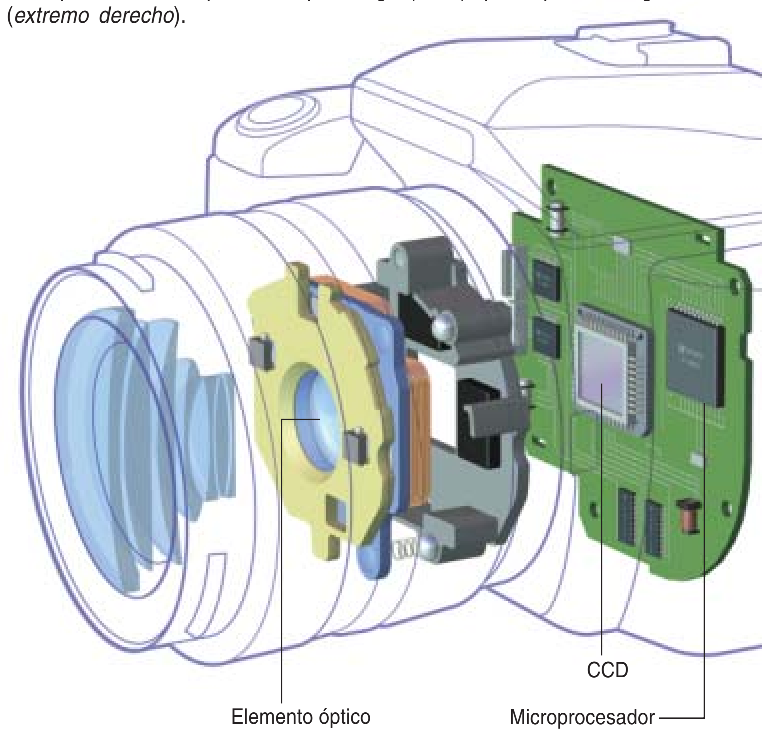
Los fotógrafos que así se dirigen a quienes retratan podrían obtener una imagen borrosa si ellos mismos mueven las manos, aunque sea ligeramente, al pulsar el obturador y sacudir así la cámara. El problema es tan corriente entre quienes emplean cámaras y videocámaras digitales (sobre todo cuando la luz es escasa y el obturador debe permanecer abierto más tiempo), que los fabricantes están introduciendo unos sistemas de estabilización de imagen que compensan de forma automática esos movimientos parásitos. La industria se está orientando hacia unas cámaras más pequeñas, con mayor número de megapíxeles y unos zooms más largos que amplifican las sacudidas; al propio tiempo, trata de mejorar la calidad de la imagen.

Las cámaras digitales emplean dos tipos de mecanismos de estabilización de la imagen. En uno de ellos se hace que una parte del objetivo se desplace en el mismo sentido que la sacudida, con lo que la luz se refracta en la dirección apropiada para compensar el efecto indeseado; en el otro se mueve el dispositivo de acoplamiento por carga (CCD), el sensor que capta la imagen. Los expertos partidarios del primer procedimiento afirman que mover el CCD detrae nitidez a la imagen, sobre todo si se emplea flash. Los diseñadores del método CCD señalan que éste opera con cualquier objetivo que se acople a la cámara, lo que hace innecesaria la compra de objetivos distintos.

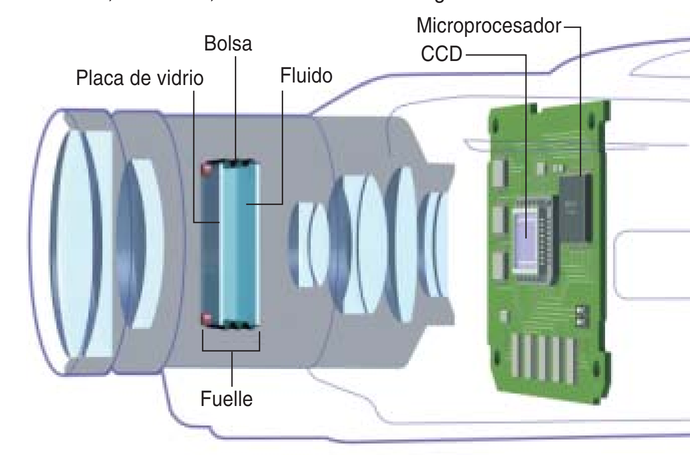
Las videocámaras emplean también dos métodos de corrección: el movimiento de un fuelle que forma parte del conjunto del objetivo o el ajuste digital de los píxeles del CCD que captan la luz incidente. El segundo, que a veces se llama estabilización electrónica de la imagen, es de realización más sencilla y barata, pero reduce entre un 10 y un 20 por ciento el campo visual del aparato.

Los diseñadores están buscando procedimientos adecuados a las cámaras de fotos. Sin embargo, por ahora, las soluciones disponibles requieren una capacidad de procesado superior a la de los modelos actuales. Todos los sistemas empleados aumentan el coste y la complejidad. La estabilización de imagen empezó en las cámaras de gama alta porque en éstas los objetivos de aproximación, los zooms, son más largos y requieren una compensación de sacudidas mayor. Pero a las cámaras de menos precio ya se están incorporando zooms de 10 e incluso 12 aumentos, por lo que también a éstas deberá adaptarse la estabilización de la imagen.

1. PARA CORREGIR LA BORROSIDAD debida al temblor de la mano del fotógrafo, las cámaras digitales ajustan rápidamente la posición de un elemento óptico del objetivo o mueven convenientemente el dispositivo de acoplamiento por carga (CCD) que capta la imagen (*extremo derecho*).



4. LAS VIDEOCAMARAS DIGITALES contienen un prisma de ángulo variable, o fuelle, que refracta la luz para compensar la sacudida. Otro procedimiento, sin fuelle, es la estabilización digital.



GEORGE RETSECK; FUENTE: EASTMAN KODAD Y CANON USA; ENVISION/CORBIS (*fotografías*)

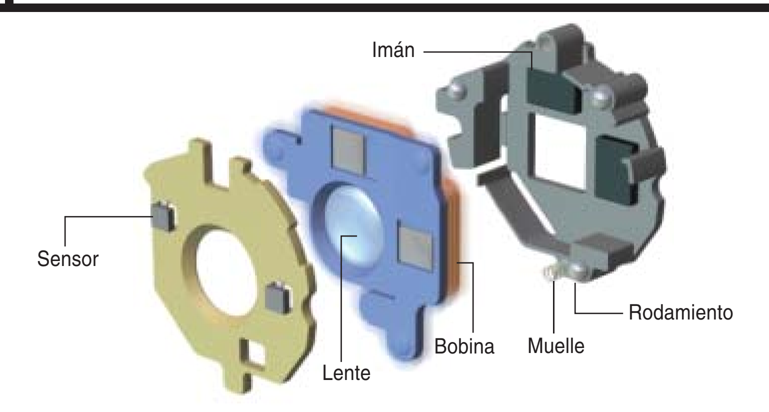
¿SABIA USTED QUE...?

➤TOMAS PAN: En el rodaje de una película, es frecuente tomar vistas pan, tomas en que la cámara sigue la acción. Pero un sistema de estabilización trata de contrarrestar ese movimiento. La corrección se anula mediante un programa informático; si todos los píxeles se mueven al unísono, el cambio se aprecia como una toma pan, no como un movimiento brusco accidental. Sin embargo, no hay sistema que distinga entre ambas cosas durante las primeras fracciones de segundo. Algunas cámaras permiten anular a voluntad el sistema de estabilización.

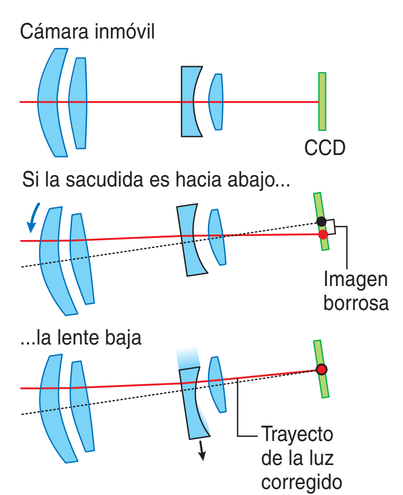
➤TELEFONOS CELULARES: Ante su limitación espacial, resulta difícil hacer sitio al mecanismo de estabilización de imágenes en las cámaras de los teléfonos celulares. Además, los teléfonos deben superar una prueba de caída, que es muy dura para la mecánica. La estabilización digital la pasaría sin problemas.

➤BINOCULARES: Aun la más leve de las sacudidas manuales hace borrosa la imagen que se ve a través de unos binoculares potentes, puesto que su aumento elevado agrava el error. Canon ha introducido en cada uno de los cilindros de sus binoculares de gama alta los mismos fuelles de corrección que usa en las videocámaras.

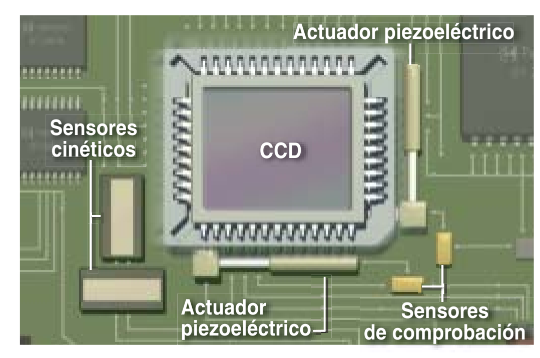
➤ANALOGIAS RAPIDAS: En los folletos publicitarios de las cámaras con estabilización de imagen se destaca que el sistema funciona hasta para tres velocidades del obturador. La idea es que si, en ausencia de corrección, el usuario no logra inmovilizarse lo suficiente para sacar una foto no borrosa con una velocidad de obturador inferior a 1/125 de segundo, sí puede mantenerse quieto por lo menos durante 1/60, 1/30 y posiblemente 1/15 de segundo.

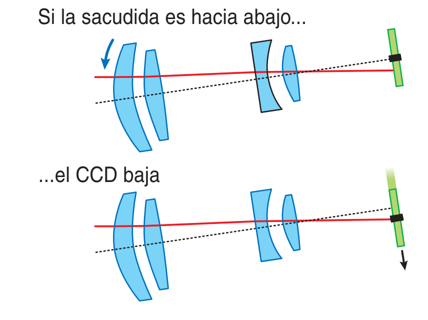


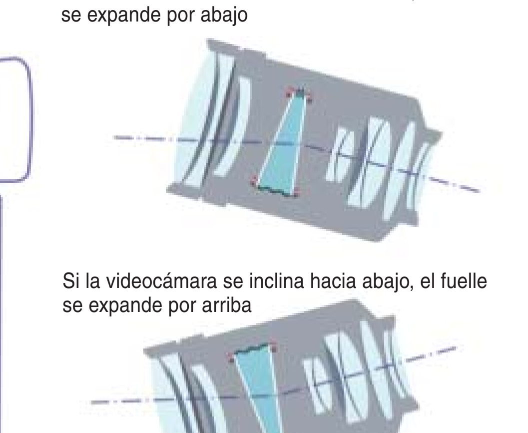
2. EL ELEMENTO OPTICO se mueve con libertad sobre unos rodamientos —hacia arriba, abajo, izquierda o derecha— por el interior de su montura, merced a unas bobinas solidarias cuyo movimiento es inducido por imanes. (En otros modelos, el movimiento de la lente lo producen varillas piezoeléctricas.) La dirección y la velocidad del movimiento parásito de la máquina se detectan mediante sensores que envían las señales al microprocesador que controla los imanes. Si la cámara se inclina hacia abajo, el microprocesador hace que el elemento descienda, de modo que la luz que llega a éste se refracta hacia arriba. Un muelle fija el elemento en su posición inicial.



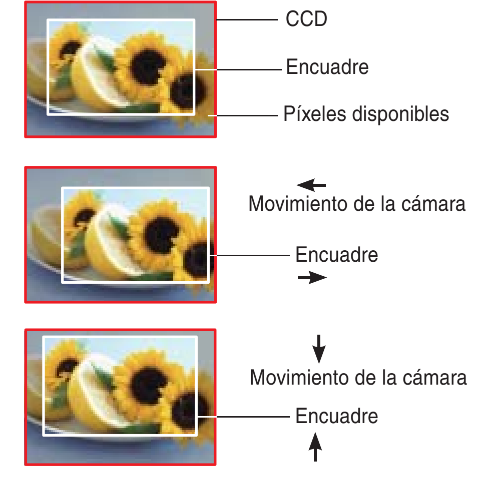
3. CUANDO LOS SENSORES cinéticos detectan un movimiento de la cámara, un microprocesador pone en funcionamiento unos actuadores piezoeléctricos que desplazan el CCD en la dirección adecuada (arriba, abajo, derecha o izquierda). Unos sensores de comprobación confirman si el CCD se ha desplazado correctamente. Cuando la cámara se inclina hacia abajo (*debajo*), el CCD desciende y así la luz no se desvía.







5. EN LA ESTABILIZACION DIGITAL no hay piezas móviles. Un programa informático encuadra la luz incidente de modo que ésta cubre sólo del 80 al 90 por ciento de los píxeles del CCD. Si la electrónica capta una sacudida hacia la izquierda, el programa ajusta el encuadre hacia la derecha (sobre los píxeles disponibles); si la sacudida es hacia abajo, el encuadre sube.



Física del siglo XXI

En busca de la unificación

THE NEW PHYSICS FOR THE TWENTY-FIRST CENTURY. Dirigido por Gordon Fraser. Cambridge University Press; Cambridge, 2006.

MANY WORLDS IN ONE, por Alex Vilenkin; Hill and Wang; Nueva York, 2006.

THE COSMIC LANDSCAPE: STRING THEORY AND THE ILLUSION OF INTELLIGENT DESIGN, por Leonard Susskind. Little Brown; Nueva York, 2006.

CHAOS AND HARMONY: PERSPECTIVES ON SCIENTIFIC REVOLUTIONS OF THE TWENTIETH CENTURY, por Trinh, Xuan Thuan. Templeton Foundation Press; Philadelphia, 2006.

ENTANGLED WORLD: THE FASCINATION OF QUANTUM INFORMATION AND COMPUTATION. Dirigido por Jürgen Audretsch. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA; Weinheim, 2006.

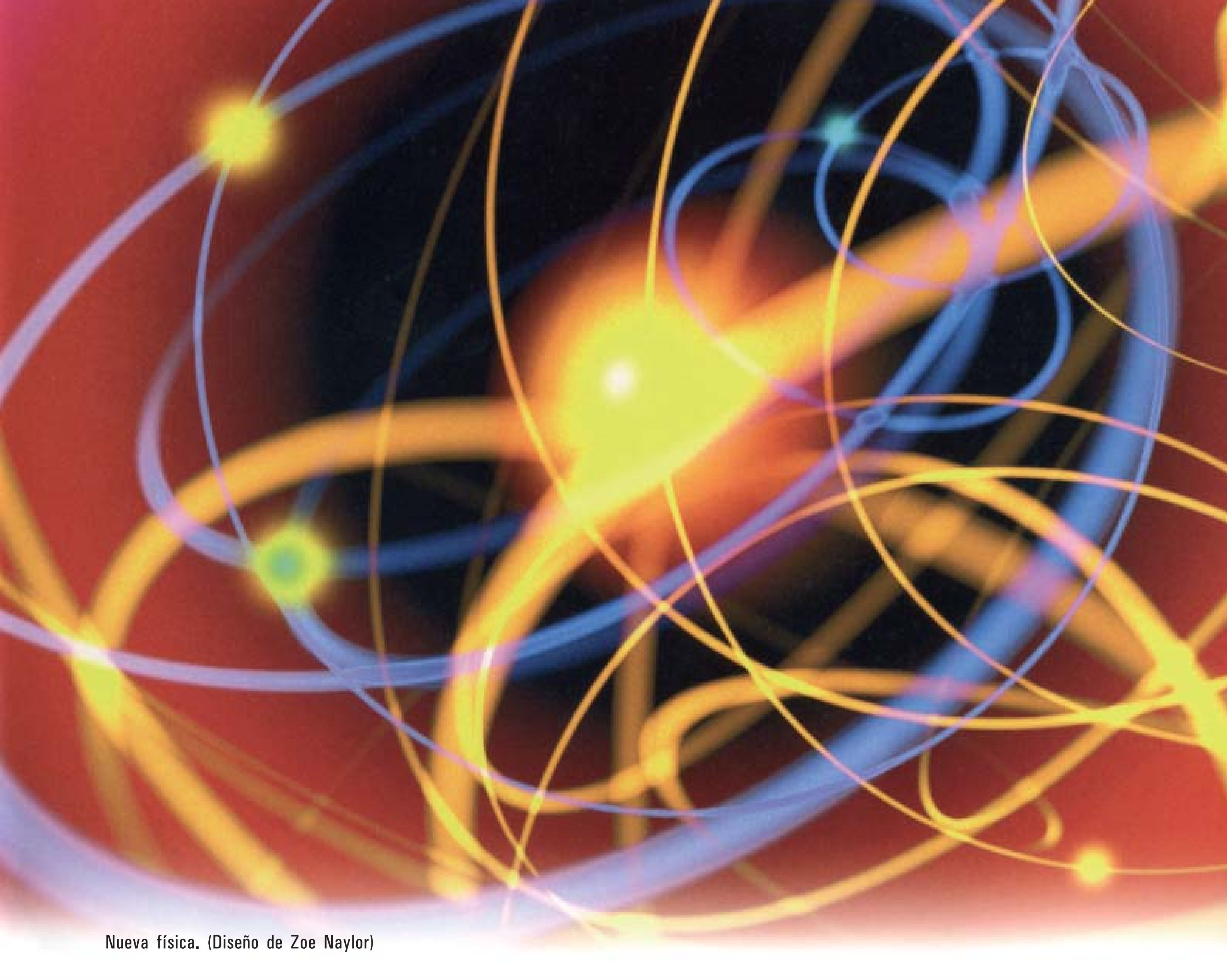
Tiempos fecundos éstos para la física, en los que no se ha cumplido el augurio de su relegación ante el poderoso avance de la biología molecular. La física, ciencia de la materia, componente del universo que nos rodea, y de la energía, o capacidad de la materia para actuar de formas diversas, rompió con las leyes deterministas que desde Newton venían guiando sus pasos en los primeros decenios del siglo XX. El advenimiento de la mecánica cuántica y la relatividad cuartearon un modelo agotado de causa y efecto. En última instancia, las probabilidades gobernaban el mundo. La teoría general de la relatividad de 1915 sustituyó a la teoría newtoniana de la gravedad, conduciendo a una unificación de la fuerza de la gravedad con la geometría del espaciotiempo. La teoría cuántica, por su lado, aportó el marco para la comprensión de la estructura del átomo, su núcleo y las partículas elementales de las que consta.

Dondequiera que miremos, el universo se nos ofrece enorme. Pero consta de entidades muy pequeñas. De su descripción a macroescala se ocupa la gravedad relativista; a microescala, la física cuántica. La tajante diferencia de escalas mantuvo alejadas ambas teorías. Pero el convencimiento de que el cosmos había surgido de una "gran explosión" —un estado inicial de energía altísimamente concentrada donde había imperado la física cuántica y donde la gravedad había desempeñado un papel dominante— instó la búsqueda de una teoría unitaria. En los inicios de los setenta se convergió ya en una explicación comprehensiva de tres fuerzas fundamentales —fuerte, débil y electromagnética— en el modelo estándar.

También llamado modelo de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker de la gran explosión caliente, hunde sus raíces en la teoría general de la relatividad, los trabajos de Aleksandr Alexandrovich Friedmann (1888-1925) en 1922 y de Georges Edouard Lemaître (1894-1966) en 1927 sobre las soluciones de la ecuación de la relatividad general de Einstein, así como los de H. P. Robertson y A. G. Walker sobre las simplificaciones del espaciotiempo, impuestas por el "principio cosmológico" de homogeneidad e isotropía del universo, la llamada métrica de Robertson-Walker desarrollada en 1935. Añádanse la observación de la expansión del universo por Edwin Hubble en 1929, el desarrollo de la teoría de la nucleosíntesis por Ralph Alpher, George Gamow y Robert Herman a comienzos de los cincuenta y el descubrimiento de la radiación cósmica de microondas por Arno Penzias y Robert Wilson en 1964. El modelo de la gran explosión caliente propone que, a gran escala, el universo es homogéneo e isotrópico. Un universo homogéneo tiene las mismas propiedades (densidad, temperatura, velocidad de expansión, etcétera) en cualquier punto del espacio. Un universo isotrópico parecería el mismo desde cualquier dirección que lo observáramos.

Al abordar los componentes últimos de la materia, se distingue entre hadrones (protón, pión y cien más), compuestos a su vez de quarks, y leptones (electrones y neutrinos entre ellos). Quarks y leptones parecen ser indivisibles y carentes de estructura dentro de los límites actuales de resolución. Se sabe, además, que las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas de los quarks y leptones son consecuencia de simetrías que observamos en la naturaleza.

Liberada del yugo determinista, la naturaleza da rienda suelta a su creatividad. La aleatoriedad ha invadido un mundo que otrora se consideraba regulado hasta en sus mínimos detalles. En la teoría del caos, la magnitud del efecto no depende de la magnitud de la causa; algunos fenómenos se revelan tan sensibles a las condiciones iniciales, que un cambio infinitésimo en ellas desemboca en variaciones imponentes e imprevisibles en el comportamiento subsiguiente del sistema. Las leyes inmutables de la física se limitan a ser meras guías generales en torno a lo que cabe experimentar e improvisar. Definen el reino de lo permitido y sugieren posibilidades, que la naturaleza debe actualizar. La simetría sólo interesa desde el momento en que puede romperse. La materia innova cuando se halla lejos del equilibrio. Queda erradicado el orden perfecto, mientras que el desorden controlado es fecundo y el



Nueva física. (Diseño de Zoe Naylor)

caos está preñado de novedades. La naturaleza no puede caracterizarse ya por lo lineal y las simples formas geométricas, sino por formas mucho más complejas. La materia se autoorganiza de acuerdo con principios y leyes de la complejidad. Adquiere propiedades "emergentes" que no pueden explicarse en términos de sus componentes (*Chaos and Harmony: Perspectives on Scientific Revolutions of the Twentieth Century*).

Y lo que quizá constituye el mayor enigma de todos, el universo encierra mucho más de lo que vemos. La materia y energía que nos son familiares parecen constituir sólo la punta de un iceberg cósmico. Sólo un 5 por ciento de la masa del universo se halla en forma de bariones, de los que están formadas las estrellas y las personas. El 95 por ciento restante sería "materia obscura" (25 por ciento), que opera como un gas de partículas, no bariónicas, y "energía obscura" (70 por ciento), que es el nuevo nombre de la constante cosmológica de Einstein o algo que actúa como ella. Las pruebas a favor de la existencia de tales componentes "obscuros" son poderosas, pero se conocen deficientemente sus propiedades (*The New Physics for the Twenty-First Century*).

La materia visible en forma de galaxias se halla distribuida en grandes cúmulos y extensos filamentos con vacíos y burbujas a escalas de hasta cientos de millones de años luz. A medida que el universo se aborda a escalas de valor creciente, aumenta la uniformidad de la distribución de materia. En una buena aproximación, la radiación cósmica de fondo es uniforme. Aunque el modelo estándar de la gran explosión caliente supone que el universo es homogéneo e isotrópico a grandes escalas, no aporta una razón de ello. La materia obscura no emite luz y, por lo que parece, no experimenta interacciones fuertes ni electromagnéticas. En teoría, el candidato más plausible para esa materia es una nueva especie de partícula que se produjo en el universo temprano y que interacciona sólo débilmente con la materia ordinaria. Esta nueva especie de materia tiene que ser fría, es decir, alcanzar una velocidad típica mucho menor que la velocidad de la luz. Por ese motivo, se la denomina "materia obscura fría".

No existen pruebas de antimateria en forma de estrellas, galaxias, cúmulos galácticos. Sin embargo, la antimateria tuvo que ser enorme cuando la temperatura del universo presentaba un valor lo suficientemente elevado para crear pares materia-anti-

materia. Para evitar la aniquilación completa de materia y antimateria, el universo en su fase temprana debió ofrecer una ligerísima asimetría entre la densidad de materia y la densidad de antimateria. Las teorías sobre el origen de la asimetría materia-antimateria implican todas la violación de la conservación de la paridad de carga (CP) y la violación de la ley de conservación del número bariónico. Mientras la violación CP se ha observado en reacciones que implican kaones y mesones B, no existe, por desgracia, prueba experimental de la violación del número bariónico (como la desintegración del protón).

En un modelo cosmológico homogéneo e isotrópico, la geometría espacial del universo puede ser plana, esférica o hiperbólica. El modelo estándar es coherente con el alto grado observado de platitud del universo, aunque no puede explicarla. El patrón de la distribución de galaxias a gran escala confirma la idea de que estas y otras macroestructuras se formaron bajo la influencia de la gravedad. La temperatura del universo viene a ser idéntica en todas las direcciones, si bien se dan fluctuaciones sutiles que no terminan de justificarse en el marco de la cosmología estándar.

En principio, la teoría de la inflación sobre el universo inicial sí explicaría la homogeneidad e isotropía del cosmos, la platitud espacial, las semillas de estructura y las anisotropías de la temperatura. Pero aunque la inflación resuelve algunos problemas, deja abiertas cuestiones importantes; la principal, ¿de dónde extrae su energía la inflación? Con cada adelanto, afloran siempre cuestiones nuevas. ¿Cómo empezó el universo? ¿Cuál será su final?¿Qué determina las especies de partículas elementales observadas? ¿Qué principio conduce a una descripción unificada de todas ellas? ¿Cómo hacer coherente la mecánica cuántica con la relatividad general? ¿Cuál es el significado del espacio y el tiempo a distancias extraordinariamente pequeñas, dominio de la teoría cuántica? Muchas de esas cuestiones, si no todas, podrían resolverse con la teoría del todo.

La fe puesta en la posibilidad de una tal teoría comprehensiva ha constituido la fuerza motora de los diversos modelos conocidos por teorías de cuerdas, agrupadas bajo el paraguas de la "teoría M", que se han venido desarrollando en los últimos decenios. La teoría de supercuerdas (o teoría M) aparece como una vía prometedora de solución. En su seno, las partículas elementales resultan de modos vibratorios de cuerdas finísimas, de aproximadamente una longitud de Planck, es decir, 10^{-33} centímetros. La teoría predice que debe haber dimensiones espaciales adicionales allende de las urgidas por la relatividad general. Tales dimensiones extra se encuentran escondidas, porque son muy pequeñas o porque los experimentos actuales carecen de medios para detectar su existencia. Por su parte, las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes se hallan confinadas en una "brana" tridimensional dentro de un espacio de mayores dimensiones, conocido como la "masa". La gravedad puede propagarse a través de la "masa".

Para los físicos, las soluciones suelen ser más importantes que las teorías: las observaciones se comparan con las propiedades que emergen de una teoría, no con el propio constructo. Pero hallar soluciones realistas a las teorías —soluciones que reproducen los rasgos del universo que ahora observamos— se ha convertido en empresa mucho más dura que la mera construcción de teorías. Stephen Hawking y Thomas Hertog defendieron la "propuesta sin límites", así llamada porque elimina la frontera del espaciotiempo. De acuerdo con ese enfoque, el universo es una superficie cerrada —como una superficie de un balón inflacionario—, sin comienzo en el tiempo. Semejante cierre del espaciotiempo carece de sentido dentro de la teoría general de la relatividad clásica y requiere la introducción de aspectos de la mecánica cuántica.

En un trabajo reciente, Hawking y Hertog han reformado su "propuesta ilimitada" en su nuevo modelo de "cosmología de arriba abajo". En un modelo de abajo arriba se parte de unas determinadas condiciones iniciales y se calcula la evolución del universo hasta el estado actual observado. Este proceso requiere unos valores iniciales muy específicos y finamente sintonizados. El proceso de arriba abajo orilla el problema de las condiciones ajustadas, para abordar



Entrecruzamiento. (Diseño de Himmelfarb)

Análisis sin problemas

ANALYSE. RECUEIL D'EXERCICES ET AIDE-MÉMOIRE. Vol. 1 y 2, por Jacques Douchet. Presses Polytechniques Romandes; Lausanne, 2004.

Colección en dos volúmenes que contiene 1739 (1277 + + 462) ejercicios resueltos de análisis matemático, entre los cuales no hay ni un solo problema. Son libros destinados a alumnos de un primer curso universitario en matemáticas, tanto en facultades como en escuelas técnicas. Los nueve capítulos del primer volumen están dedicados a funciones de una variable; se abordan los temas acostumbrados: números reales y complejos, series numéricas, funciones de una variable real, diferenciación, integración y ecuaciones diferenciales elementales. Los cuatro capítulos del segundo volumen están dedicados a funciones de varias variables reales, incluidas la topología del espacio real de dimensión arbitraria, derivadas parciales e integrales múltiples.

Cada capítulo está precedido de una recopilación de las definiciones y resultados teóricos, sin demostraciones, necesarios para la resolución de los ejercicios propuestos. Y al final de cada volumen hay formularios, destinados a los estudiantes que han olvidado las matemáticas elementales. Los ejercicios propuestos en la primera mitad de cada volumen se resuelven bastante detalladamente en la segunda.

Se trata en suma de un texto bien adaptado tanto a los métodos docentes en uso como al tipo de estudiantes universitarios actuales. Parece que en Suiza, país de origen del libro, padecen un sistema educativo similar al nuestro, en el que los estudiantes superan la enseñanza primaria y la secundaria sin adquirir el necesario dominio de las operaciones matemáticas elementales. Esto hace necesario que a una edad inadecuada deban repetir series interminables de ejercicios similares para adquirir un dominio de las técnicas operativas, que podrían haber adquirido a edad más temprana con mayor facilidad. Ese aspecto está bien recogido en el texto, hay series de ejercicios con diferencias mínimas, enormemente aburridos para un alumno con imaginación, pero muy útiles para la mayoría de los estudiantes, que carecen de esta cualidad.

No he tenido la paciencia de leer los 1739 ejercicios, pero he analizado con detalle las partes más propicias para proponer verdaderos problemas, cuya resolución requiera un esfuerzo intelectual y produzca cierta satisfacción, y no he podido encontrar ninguno. Esto, según se mire, puede considerarse mérito o demérito del libro. No es bueno descorazonar a la juventud mostrándole que existen metas que sólo se alcanzan con esfuerzo.

—JOSÉ MANUEL AROCA

las propiedades del universo tal cual se observan ahora; a partir de ahí se calcula su historia procediendo hacia atrás. Alternativa a las propuestas de Hartle-Hawking es la de Alexander Vilenkin, según la cual el universo, en un comienzo, emerge por efecto túnel de un estado cuántico donde el espacio y el tiempo no están definidos (*Many Worlds in One*).

En una cosmología de arriba abajo, la elección de las condiciones de partida que nos han de servir para retrotraernos en la historia del universo no distingue con nitidez entre condiciones antrópicas —que deben ser así porque de otra forma no hubiera habido humanidad que las pudiera observar— y condiciones que surgieron accidentalmente durante el desarrollo del universo. El razonamiento antrópico constituye hoy un auténtico campo de Agramante. Para unos, ese tipo de razonamiento abandona la indeclinable obligación de establecer mediante ecuaciones las propiedades de la naturaleza.

Pero cuando con mayor ahínco se buscaba una teoría física solvente y unificadora, la presencia del principio antrópico se torna, para otros, más apremiante. De hecho, la teoría de cuerdas ha dado alas a sus partidarios. Así, Leonard Susskind, de la Universidad de Stanford, con su nueva aproximación a la realidad denominada paisaje de supercuerdas, en el que el universo conocido es sólo un mínimo rincón de una realidad mayor (The *Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*). Si anda en lo cierto, la teoría de cuerdas implicaría la posible existencia de un número incontable de combinaciones de propiedades.

Ya en el año 2000, Joseph Polchinski y Raphael Bousso publicaron un artículo que hizo época en el *Journal of High Energy Physics* (*JHEP*) y puso el paisaje en el mapa de la teoría de cuerdas. Demostraron que la teoría permitía un número altísimo de estados de vacío metaestables: espacios que podían existir largo tiempo con un abanico inmenso de propiedades físicas, tales como las masas de las partículas fundamentales y la densidad de energía en el vacío de espacio. (Por energía de vacío se entiende la energía almacenada en las fluctuaciones cuánticas del espacio vacío.)

Para Susskind, el paisaje de cuerdas se ajusta perfectamente a los avances registrados en la cosmología inflacionaria de Alan Guth, Andrei Linde y otros. Si el origen inflacionario del universo conocido es correcto, el mismo proceso podría haber sucedido una y otra vez, con nuevos universos "burbuja" formados *ad infinitum*: un escenario conocido por inflación eterna. A comienzos de los ochenta, Linde, Andrei Sakharov y otros señalaron que los "multiversos" resultantes de burbujas podrían explicar, siguiendo un razonamiento antrópico, determinados misterios. Cada burbuja podría tener una diferente densidad de energía de vacío, algunas muy elevado. Pero una energía importante de vacío hace imposible la formación de galaxias (y por tanto de estrellas, planetas y personas). Para que se diera la vida, nuestra burbuja debió tener, por tanto, una pequeña energía de vacío, cero quizá.

Uno de los dominios más fecundos de los últimos años se halla en el dominio de los "cuantos en acción", donde se incluyen los conceptos de entrecruzamiento, teleportación, cifrado y computación cuántica. Los nuevos métodos podrían gestionar la información como bits cuánticos, o qubits (*Entangled World: The Fascination of Quantum Information and Computation*). En el mismo plano de interés se encuentra un notable efecto cuántico, la así llamada condensación de Bose-Einstein, en la cual los átomos se enfrían hasta temperaturas muy bajas. Entrecruzamiento y condensado se predijeron hace tres cuartos de siglo.

—LUIS ALONSO

ÍNDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2006.*

MATERIAS

AUTORES

...DE ENERO 2007



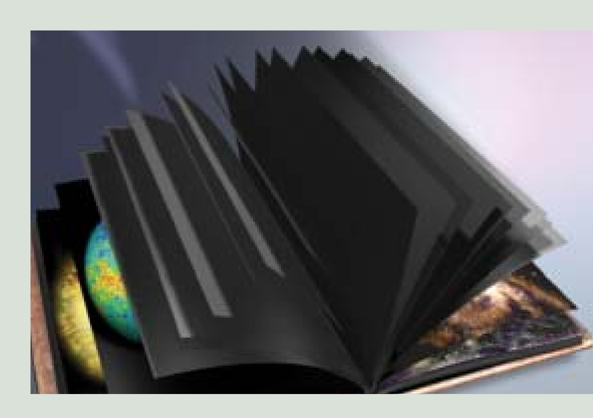
ESPEJOS ROTOS: UNA TEORIA DEL AUTISMO, por Vilayanur S. Ramachandran y Lindsay M. Oberman

Los estudios del sistema neuronal especular pueden revelar pistas sobre las causas del autismo. Contribuirán así al desarrollo de nuevas vías de diagnosis y tratamiento de ese trastorno.



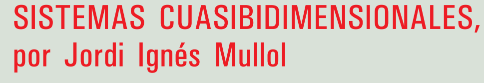
RECUPERACION DE ZONAS DEPRIMIDAS, por Laurence Mee

¿Cómo podemos restaurar los mares costeros devastados por el crecimiento incontrolable de algas y plantas que provoca la actividad humana?



LA EDAD OSCURA DEL UNIVERSO, por Abraham Loeb

Entre la gran explosión inicial y la formación de las primeras estrellas, el cosmos estaba completamente a oscuras. Se empieza a descubrir la historia de esa etapa temprana del universo.



SISTEMAS CUASIBIDIMENSIONALES, por Jordi Ignés Mullol

La agregación de la materia en un número restringido de dimensiones impide la existencia de orden cristalino. En cambio, favorece la aparición de estructuras con un orden parcial. Podrían resultar muy útiles para la fabricación de nanodispositivos.

EL ORIGEN DE LAS CONSTELACIONES GRIEGAS, por Bradley E. Schaefer

Astronomía y arqueología, coordinadas, han descifrado la historia del origen de las figuras de las estrellas y su utilización por pueblos diversos a través de los tiempos.

